



Vlaanderen
is kwaliteitsvolle
omgeving

Kartering van kunstmatige ondiepe ondergrondse drainage in Vlaanderen, voorstudie

Kartering van kunstmatige ondiepe ondergrondse drainage in Vlaanderen, voorstudie

Dit rapport onderzoekt welke methodieken beschikbaar zijn om kunstmatige, ondiepe en ondergrondse drainage in Vlaanderen in kaart te brengen. Daartoe werd een inventaris van gedraineerde percelen opgesteld en ingezet voor de kalibratie en validatie van GIS-en satelliet-gebaseerde karteringstechnieken.

Dit rapport bevat de mening van externe auteur(s) en niet noodzakelijk die van de Vlaamse overheid.

COLOFON

Verantwoordelijke uitgever

Toon Denys, secretaris-generaal
Departement Omgeving
Koning Albert-II laan 15 bus 553, 1210 Brussel (postadres)
vlaanderen.be/omgeving

Een uitgave van het Departement Omgeving, Beleid
beleid.omgeving@vlaanderen.be

Auteurs

Michiel Maertens – VITO
Ingeborg Joris – VITO
Stefan Livens – VITO
Jan Biesemans – VITO
Jo Van Valckenborgh – Digitaal Vlaanderen
Veronique De Laet – GIM
Julien Lacroix – GIM

Publicatiedatum

25 maart 2026

Depotnummer

D/2026/3241/114

Partners



DIGITAAL
VLAANDEREN



SAMENVATTING

Ondanks hun belangrijke invloed op de Vlaamse waterbalans, blijft de ligging van kunstmatige ondiepe ondergrondse drainagesystemen (klassieke of peilgestuurde) in Vlaanderen grotendeels een blinde vlek. Momenteel bestaat er immers geen systematisch overzicht van de ligging van deze drainagesystemen in Vlaanderen. Dergelijke kennis is nochtans waardevol in het kader van verschillende Vlaamse en Europese beleidskaders, zoals bijvoorbeeld de Blue Deal, het Mestactieplan, de Europese Natuurherstelwet of de LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry)-verordening.

In deze voorstudie werd onderzocht welke methodieken vandaag beschikbaar zijn om ondergrondse drainage in Vlaanderen te karteren. Als basis werd een inventaris samengesteld van 628 gedraineerde percelen, opgebouwd uit administratieve gegevens uit het Omgevingsloket (veruit de grootste bron), aangevuld met datasets afkomstig uit de literatuur, en een beperkte respons van gecontacteerde relevante instanties. De inventaris toont duidelijk dat drainage vooral voorkomt op vlakke, vochtige bodems, met ondiepe grondwatertafels.

Op basis van deze inventaris werden drie methodieken getest om de haalbaarheid van verschillende karteringstechnieken na te gaan (GIS-analyse, afleiden van bodemvochtproxy op basis van publieke satellietdata en identificeren van drainagepatronen op VHR-beelden) in een Vlaamse context.

De GIS-gebaseerde methode waarbij verschillende relevante GIS-lagen (bodemdrenage-classes, topografie en grondwaterdiepte) gecombineerd werden tot een drainagevermoedenskaart resulteerde in consistente patronen van drainageverwachting. De scenario-analyse toonde wel dat de resultaten sterk afhangen van de aannames over niet-gedraineerde percelen. De uitkomst is een realistische, maar indicatieve drainagekanskaart en bijgevolg niet bruikbaar als binaire kaart op perceelsniveau.

In deze voorstudie werd ook onderzocht in welke mate remote-sensing informatie kan bijdragen aan het onderscheiden van gedraineerde en niet-gedraineerde percelen. Daarbij werd in het stroomgebied van de Grote Kemmelbeek getest of afgeleide bodemvochtproxies op basis van Sentinel-2 zinvol kunnen worden ingezet. Hiervoor werd gebruikgemaakt van de OPTRAM-methode, die bodemvocht inschat op basis van de relatie tussen infrarood-informatie vegetatiebedekking. De OPTRAM-methode kon echter moeilijk een duidelijk onderscheid maken tussen gedraineerde en niet-gedraineerde percelen. De bodemvochtproxies bleken sterk beïnvloed te worden door omgevingsfactoren zoals helling, landbouwpraktijken en bodemtype, waardoor het niet mogelijk was om een eenduidig drainagesignaal te isoleren. Daarnaast beperkte de beperkte beschikbaarheid van geschikte, wolkenvrije tijdsreeksen de mogelijkheden om bodemvochtevoluties in detail te analyseren.

Ook Very High Resolution (VHR) satellietbeelden leverden in Vlaanderen geen overtuigende draiangepatronen op, in tegenstelling tot bevindingen in Noord-Frankrijk. Geschikte opnamecondities om drainagepatronen te identificeren bleken zeldzaam en de enkele patronen die in West-Vlaanderen werden waargenomen bleken vooral gerelateerd aan ruilverkavelingen.

In dat kader is verder onderzoek nodig naar gerichte en accurate remote-sensingindices, die in combinatie met GIS-data meer inzicht kunnen bieden in hoe waarschijnlijk drainage voorkomt. Dergelijke waarschijnlijkheidskaarten op niveau van bijvoorbeeld een afstroomgebied sluiten beter aan bij verschillende beleidskaders zoals bijvoorbeeld klimaatslimme landbouw, natuurherstel of waterbuffering in het kader van droogtebestrijding.

ENGLISH SUMMARY

Despite their significant impact on the Flemish water balance, the spatial distribution of artificial shallow subsurface drainage systems (both conventional and controlled drainage) remains largely a blind spot in Flanders. At present, there is no systematic overview of the location or functioning of these drainage systems. Such information is nevertheless highly valuable in the context of several Flemish and European policy frameworks, including the Blue Deal, the Manure Action Plan, the European Nature Restoration Law, and the LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry) Regulation.

This pre-study investigated which methodologies are currently available to map subsurface drainage in Flanders. As a basis, an inventory of 628 drained parcels was compiled, primarily using administrative data from the Environmental Permit Platform (by far the largest data source), supplemented with datasets from literature and limited input from relevant contacted organizations. The inventory clearly shows that drainage predominantly occurs on flat and wet soils with shallow groundwater tables.

Based on this inventory, three methodologies were tested to map artificial subsurface drainage in a Flemish context: GIS-based analyses, the derivation of soil moisture proxies from publicly available satellite data, and the identification of drainage patterns using very high resolution (VHR) satellite imagery.

The GIS-based approach, combining several relevant spatial layers (soil drainage classes, topography and groundwater depth) into a drainage likelihood map, resulted in spatially consistent drainage patterns. However, the scenario analysis demonstrated that the results strongly depend on assumptions regarding non-drained reference parcels. The outcome is therefore a realistic but indicative drainage probability map, which is not suitable for binary classification at parcel level.

This pre-study also examined the extent to which remote-sensing information can contribute to distinguishing between drained and non-drained parcels. Within the Grote Kemmelbeek catchment, the potential of soil moisture proxies derived from Sentinel-2 data was assessed using the OPTRAM method, which estimates soil moisture based on the relationship between infrared reflectance and vegetation cover. However, this approach proved insufficient to robustly distinguish drained from non-drained parcels. The derived soil moisture proxies were strongly influenced by environmental factors such as slope, agricultural practices and soil type, making it impossible to isolate a clear drainage signal. In addition, the limited availability of suitable, cloud-free time series restricted the detailed analysis of soil moisture dynamics.

Very high resolution (VHR) satellite imagery also failed to provide convincing drainage patterns in Flanders, in contrast to findings from northern France. Suitable acquisition conditions were rare, and the few patterns observed in West Flanders were mainly related to land consolidation rather than drainage infrastructure.

Overall, the results show that none of the investigated methods currently allows for unambiguous, binary detection of subsurface drainage at Flemish scale. The added value of further drainage

mapping therefore primarily lies at the catchment scale, where the focus shifts from whether a parcel is drained to how likely drainage occurs and how relevant this is in relation to specific policy objectives.

In this context, further research is needed into targeted and accurate remote-sensing indices that, in combination with GIS data, can provide additional discriminatory power. Such probability-based maps at the scale of, for example, a catchment are better aligned with policy frameworks addressing climate-smart agriculture, nature restoration, and water buffering in support of drought mitigation.

INHOUDSTAFEL

1	Inleiding.....	11
2	Literatuur-overzicht.....	13
2.1	GIS-methodieken	13
2.2	Kartering van kunstmatige ondergrondse drainage via remote-sensing technieken	15
2.2.1	Detectie op basis van publiek beschikbare satellietbeelden	15
2.2.2	Patroondetectie op VHR-beelden	20
2.3	Initiatieven uit de grijze literatuur: nationale drainage-inventarisaties	24
2.4	Evaluatie-criteria en schaalhiërarchie tussen de methodieken	27
3	Opstellen van een inventaris van gedraineerde percelen voor Vlaanderen.....	30
3.1	Dataset omgevingsloket	30
3.2	Literatuur: Dataset Grote Kemmelbeek en Kempen	31
3.3	Contacteren relevante instanties	31
3.4	Samenbrengen databronnen en ruimtelijke analyse	32
4	Kartering van ondergrondse drainage in Vlaanderen: test-cases.....	36
4.1	GIS-methodieken: opstellen van een drainage-vermoedenskaart	36
4.1.1	Methodologie	36
4.1.2	Resultaten	43
4.1.3	Discussie en interpretatie	48
4.2	Analyse van publieke satellietdata over Grote Kemmelbeek	51
4.2.1	Methodologie	51
4.2.2	Resultaten	54
4.2.3	Discussie en interpretatie	64
4.3	VHR-detectie van ondergrondse drainage	66
4.3.1	Methodologie	66
4.3.2	Resultaten	67
4.3.3	Discussie en interpretatie	74
5	Roadmap.....	75
5.1	Concrete aanbeveling voor vervolgtraject	75
5.2	Relevante Beleidskaders	77
6	Conclusies.....	85
7	Referenties.....	87
8	Appendices.....	90
8.1	Bijkomende neerslag- en bodemvochtsequenties	90

LIJST VAN FIGUREN

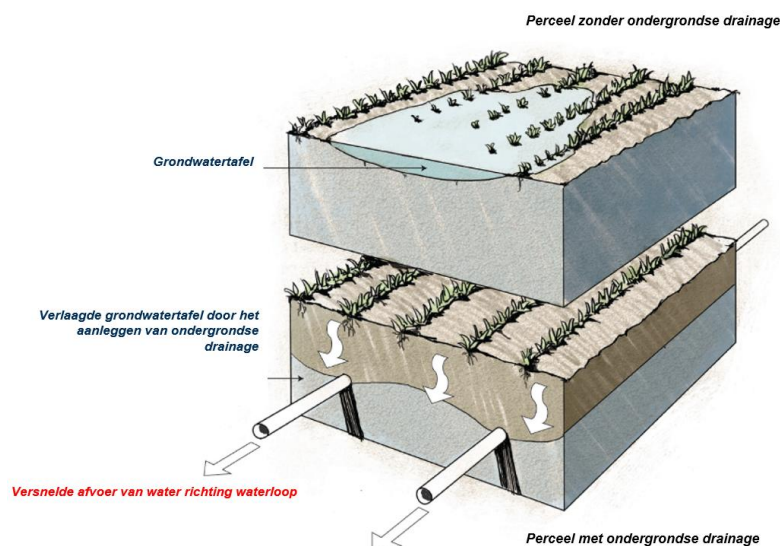
FIGUUR 1: EFFECTEN VAN ONDERGRONDSE DRAINAGE OP GRONDWATERTAFEL EN WATERAFVOER.....	11
FIGUUR 2: VOORBEELD VAN EEN GIS-METHODIEK OM ONDERGRONDSE DRAINAGE IN KAART TE BRENGEN OP BASIS VAN EEN COMBINATIE VAN GIS-LAGEN (VALAYAMKUNNATH ET AL., 2020).....	13
FIGUUR 3: SCHEMATISCH EFFECT VAN NEERSLAG OP BODEMVOCHT MET EN ZONDER DRAINAGE.....	16
FIGUUR 4: SCHEMATISCH EFFECT VAN NEERSLAG OP BODEMVOCHT MET GEWONE VS. PEILGESTUURDE DRAINAGE.....	16
FIGUUR 5: NORMALIZED DIFFERENCE MOISTURE INDEX PRODUCT BESCHIKBAAR OP HET CDSE-PLATFORM (HTTPS://BROWSER.DATASPACE.COPERNICUS.EU/).	18
FIGUUR 6: RADAR BASISPRODUCT (RGB VISUALISATIE) BESCHIKBAAR OP HET CDSE-PLATFORM (HTTPS://BROWSER.DATASPACE.COPERNICUS.EU/).	18
FIGUUR 7: SOIL MOISTURE PRODUCT MET 1 KM SPATIALE RESOLUTIE BESCHIKBAAR OP COPERNICUS LAND MONITORING SERVICE (HTTPS://LAND.COPERNICUS.EU/).	19
FIGUUR 8: VOORBEELD VAN IDENTIFICATIE DRAINAGE-BUIZEN OP BASIS VAN EEN VHR-SATELLIETBEELD (BREITKOPF ET AL., 2022).	23
FIGUUR 9: GEDRAINEERDE GEBIEDEN OP BASIS VAN LANDBOUWMEITELLINGEN, AANGEVULD MET ANDERE LANDGEBRUIKSVORMEN DIE GEDRAINEERD ZIJN (MASSOP & SCHUILING, 2016).	25
FIGUUR 10: A) PRINT-SCREEN VAN DE WEBVIEWER ONTWIKKELD IN HET BD-DRAINAGE PROJECT (PUBLIEK BESCHIKBAAR), B) AANDEEL VAN DE GEDRAINEERDE OPPERVLAKTE IN DE GEBRUIKTE LANDBOUWOPPERVLAKTE PER CANTON IN 2010 (BRON: AGRESTE – LANDBOUWTELLING 2010, PUBLIEK BESCHIKBAAR).....	26
FIGUUR 11: LOCATIES MET EEN MELDING OF AANVRAAG ONDER RUBRIEK 53.3 IN HET OMGEVINGSLOKET, OVER DE AANLEG OF WIJZIGING VAN ONDERGRONDSE DRAINAGE (OPVRAGING DATABASE: OKTOBER 2025).	27
FIGUUR 12: OVERZICHT METHODIEKEN EN GESCHIKT SCHAALNIVEAU.	28
FIGUUR 13: OVERZICHT VAN DE PERCELEN OP BASIS VAN HET OMGEVINGSLOKET, GEKLEURD VOLGENS PROJECT TYPE (OPVRAGING DATABASE: OKTOBER 2025).	31
FIGUUR 14: RUIMTELIJKE SPREIDING VAN DE INVENTARIS, SAMEN MET RELEVANTE KAARTLAGEN: (A) GRONDWATERDIEPTEKAART MET DE LIGGING VAN GEDRAINEERDE PERCELEN (GROEN), (B) HELLINGSKAART, EN (C) TOPOGRAPHIC POSITION INDEX (TPI) OP 500 M RESOLUTIE. DE HISTOGRAMMEN ONDERAAN TONEN TELKENS DE VERDELING VOOR VLAANDEREN ALS GEHEEL (GRIJS) EN VOOR DE GEDRAINEERDE PERCELEN UIT DE INVENTARIS (BLAUW): (D) GRONDWATERDIEPTE, (E) HELLING, EN (F) TPI.....	34

1 INLEIDING

Vlaanderen is doorweven met een uitgebreid netwerk van natuurlijke en kunstmatige drainagesystemen. Ondergrondse drainagebuizen maken hier een belangrijk deel van uit: ze versnellen de afvoer van water in de bodem richting het oppervlaktewater en kunnen zo rechtstreeks de waterhuishouding in de bodem en het grondwaterpeil beïnvloeden (Figuur 1). Vanaf de tweede helft van de twintigste eeuw werden deze systemen op grote schaal aangelegd door introductie van sleuvingraafmachines, vooral in landbouwgebieden, met als doel de bewerkbaarheid en productiviteit van percelen te verhogen (Agentschap Ontroerend Erfgoed, 2023).

Een snellere ontwatering in het voorjaar maakt het immers mogelijk om percelen vroeger te betreden met landbouwmachines en eerder in te zaaien. Bovendien zorgt een verlaagde grondwatertafel voor een betere zuurstofvoorziening in de wortelzone, wat de stikstofmineralisatie in de bodem stimuleert en zo leidt tot hogere gewasopbrengsten (Wyckaert, 2018).

Hoewel ondergrondse drainage duidelijke voordelen biedt voor de landbouw, brengt het ook belangrijke neveneffecten met zich mee. Drainagebuizen draineren overtollig water, en versnellen zo de afvoer van bodem- en grondwater richting waterlopen, ook op momenten dat het bijhouden van water wenselijk is. Hierdoor wordt minder water vastgehouden in de ondergrond, wat bijdraagt aan een verminderde beschikbaarheid van water tijdens droge perioden. Daarnaast kunnen drainagebuizen ook nutriënten zoals stikstof en fosfor transporteren richting waterlopen, wat kan bijdragen aan eutrofiëring van aquatische ecosystemen (Kladivko et al., 1991; Smith et al., 2015). Ook kan de ontwatering van koolstofrijke bodems, zoals veengronden, leiden tot verhoogde CO₂-emissies door versnelde afbraak van organisch materiaal (Koch et al., 2023).



Figuur 1: Effecten van ondergrondse drainage op grondwatertafel en waterafvoer.

Tegen deze achtergrond is inzicht in de ligging en werking van ondergrondse drainagesystemen essentieel voor verschillende beleidskaders die inzetten op bijvoorbeeld klimaatslimme landbouw,

1. een GIS-analyse gebaseerd op publiek beschikbare kaartlagen,
2. een remote-sensing methodiek waarbij bodemvochtproxies uit Sentinel-gegevens gebruikt worden om te onderzoeken of gedraineerde percelen te onderscheiden zijn van niet-gedraineerde
3. een verkenning van Very High Resolution (VHR)-beelden om te beoordelen of drainagepatronen rechtstreeks geïdentificeerd kunnen worden op landbouwpercelen in Vlaanderen.

In hoofdstuk 5 wordt tenslotte dieper ingegaan op een voorstel voor een realistisch vervolgtraject en de relevantie hiervan voor verschillende lopende beleidskaders.

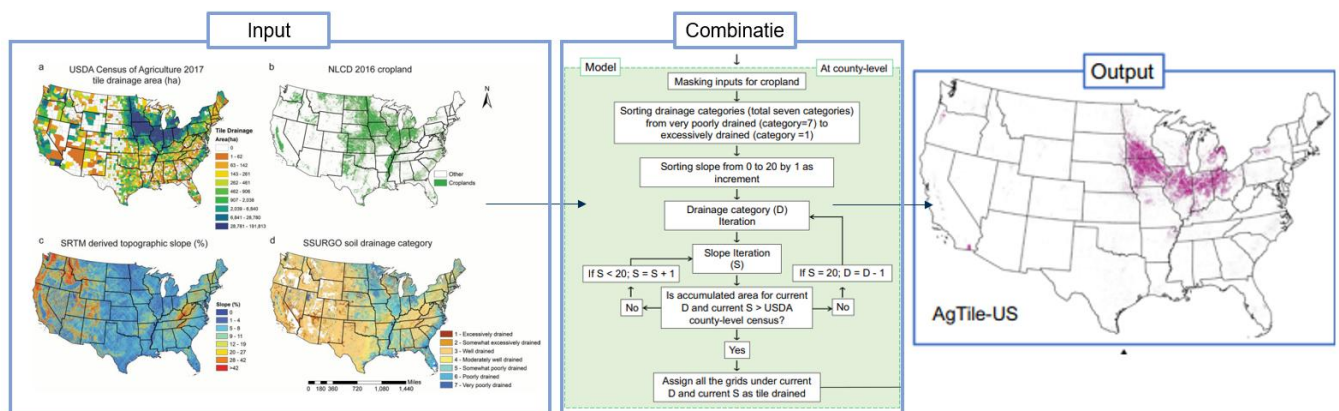
2 LITERATUUR-OVERZICHT

2.1 GIS-METHODIEKEN

Een eerste methode voor het in kaart brengen van ondergrondse drainagesystemen bestaat uit het combineren van verschillende GIS-lagen die indicatief zijn voor de aanwezigheid van ondiepe drainage. Dit maakt het mogelijk om een eerste inschatting te maken van welke gebieden (in Vlaanderen) vermoedelijk gedraineerd zijn. Een dergelijke aanpak is in verschillende eerdere studies toegepast (Brown, 2013, Pearson, 2015, Valayamkunnath et al., 2020).

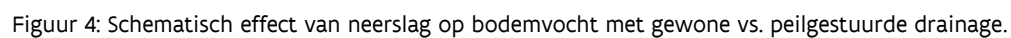
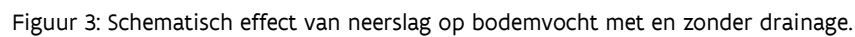
De combinatie van kaartlagen kan gebeuren via eenvoudige optelling van kaarten via een score-systeem of via een decision tree-classificatie, waarbij gebieden op basis van specifieke criteria als 'waarschijnlijk gedraineerd' worden geclassificeerd. Relevante inputkaarten bevatten informatie met betrekking tot bodemkenmerken, landgebruik, grondwaterdiepte en topografie.

Ter illustratie toont Figuur 2 een voorbeeld van een ruimtelijke analysemethode om ondergrondse drainage in de Verenigde Staten in kaart te brengen. Daarbij werden verschillende GIS-lagen m.b.t. helling, bodemdrainageklasse en landgebruik, gecombineerd via een geautomatiseerde GIS-workflow. Deze benadering resulteerde in de opmaak van een waarschijnlijkheidskaart voor ondergrondse drainage voor de Verenigde Staten met een resolutie van 30m (Valayamkunnath et al., 2020).



Figuur 2: Voorbeeld van een GIS-methodiek om ondergrondse drainage in kaart te brengen op basis van een combinatie van GIS-lagen (Valayamkunnath et al., 2020).

pagina 16 van 94



In de literatuur (Gökkaya et al., 2017, Cho et al., 2019) wordt voor detectie van drainage via variaties in bodemvocht aangeraden om satellietbeelden te gebruiken die genomen zijn onder volgende omstandigheden:

- significante neerslag > 25mm (op 1 dag)
- tijd: voor detectie drainagepatronen: ideaal 3 dagen na de neerslag

Voor detectie van de variatie in de tijd zijn dus minstens 2 opnamen nodig: 1 opname vlak voor de neerslag, en minstens 1 opname enkele dagen later (het ideale tijdsinterval tussen de twee is o.a. afhankelijk van de drainageklasse van het perceel)

Er zijn twee beperkende factoren voor het gebruik van deze methoden in de praktijk:

- **Geschiede neerslagpatronen:**

Significante neerslag op één dag, gevolgd door enkele droge dagen, komt in Vlaanderen zelden voor. Neerslag is vaak verspreid over langere perioden, wat het aantal geschikte analysevensters per jaar sterk beperkt.

- **Geschiede opnamen van satellietbeelden**

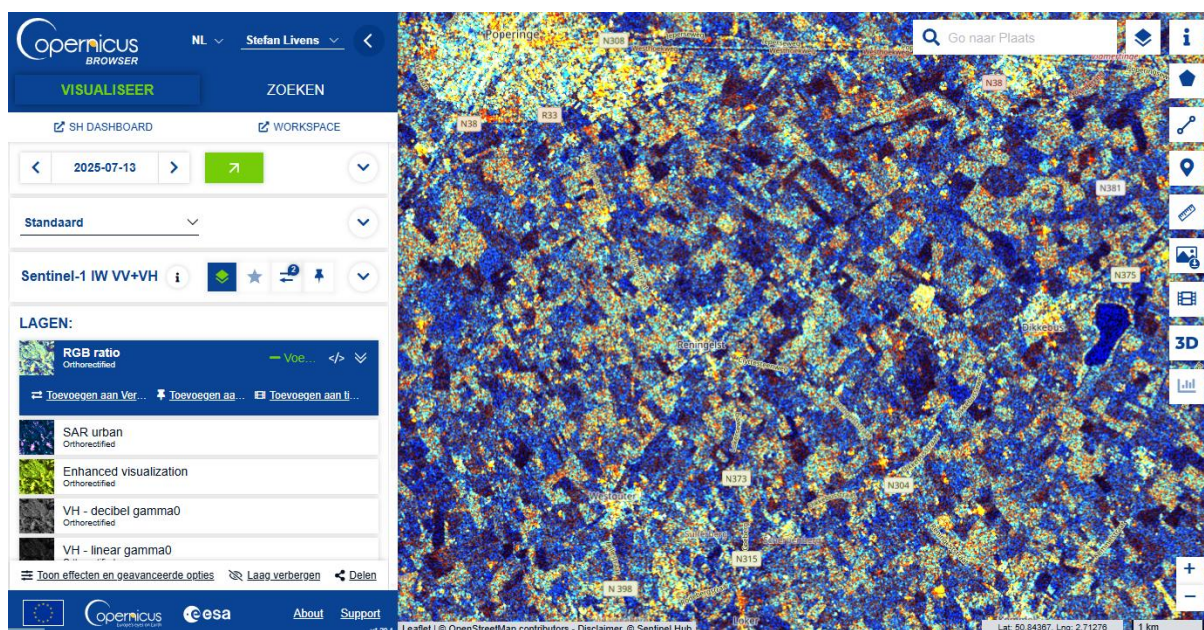
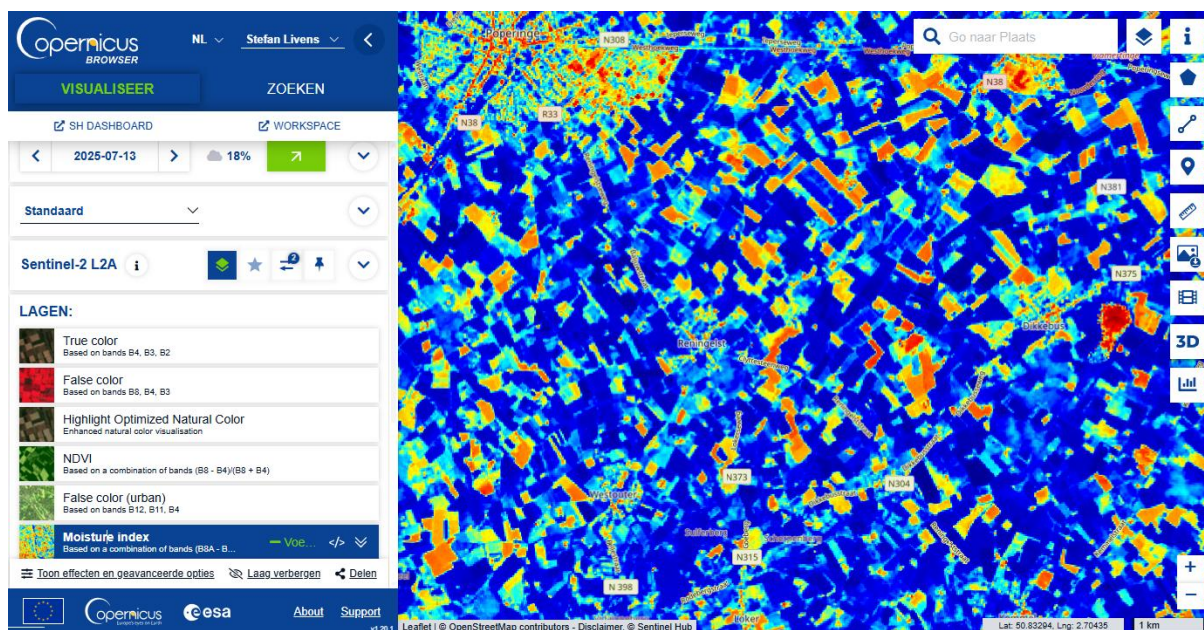
De beschikbaarheid van geschikte bodemvochtschattingen bespreken we in de volgende sectie.

Door deze beperkingen blijven er slechts enkele opportuniteiten per jaar over waarin drainage effectief via bodemvocht detecteerbaar is. Toch zijn historische datasets vaak voldoende om bestaande drainage in kaart te brengen.

Publiek beschikbare satellietopnamen

Publiek beschikbare satellietdata, zoals die van het Europese Copernicus-programma, vormen een interessante informatiebron voor de detectie van ondergrondse drainage. Satellieten zoals Sentinel-1 (radar) en Sentinel-2 (optische data) leveren met hoge frequentie beelden die vrij toegankelijk zijn via platforms zoals het [Copernicus Data Space Ecosystem \(CDSE\)](#) of [Terrascope](#). Naast 'ruwe' beelddata zijn er ook tal van afgeleide producten beschikbaar, zoals vegetatie-indices (NDVI, LAI, ...) en schattingen van bodemvocht. Vooral die laatste zijn relevant voor het opsporen van drainage.

Drainagesystemen dienen om het grondwaterpeil en bodemvochtgehalte te reguleren. De aanwezigheid ervan kan dus indirect worden opgespoord via hun effect op het bodemvocht. Remote sensing biedt verschillende technieken waarmee bodemvocht accuraat kan worden geschat (Babaeian et al., 2019), zowel op basis van optische als radarbeelden. Dataplatformen zoals het CDSE maken het gebruik van deze gegevens bovendien laagdrempeliger door het faciliteren van visualisaties en analysemogelijkheden. Een voorbeeld daarvan op telkens dezelfde locatie wordt gegeven in Figuren 5-6-7.



omdat slechts een beperkt aantal beelden wolkenvrij zijn en nog een beperkter aantal vlak voor of na neerslag beschikbaar is.

Belangrijke randvoorwaarden

In het bovenstaande werd enkel de invloed van neerslag en drainage beschouwd. In werkelijkheid wordt het vasthouden van bodemvocht ook in hoge mate door andere factoren beïnvloed. We denken hierbij in eerste instantie aan eigenschappen verbonden aan de percelen zoals drainageklasse van de bodem, hellingsgraad perceel, aanwezigheid van afwateringgrachten, ... Daarnaast kunnen irrigatie en veldbewerkingen een tijdsanalyses van bodemvocht in de war sturen. Zij dienen apart gedetecteerd te worden om foutieve interpretaties te vermijden, al vormt dit in de praktijk een uitdaging aangezien gegevens over irrigatie en veldbewerkingen vaak ontbreken.

Ook vegetatie is een belangrijke randvoorwaarde. De aanwezigheid van vegetatie heeft een dubbele invloed:

- **Op het bodemvocht zelf:** Vegetatie speelt een (complexe) rol in het vasthouden van bodemvocht (door vocht te onttrekken uit de bodem, schaduw, ...).
- **Op de schatting van bodemvocht:** De aanwezige vegetatie heeft daarnaast ook een grote invloed op de schatting van bodemvocht. Zowel de optische als de radar data worden in hoge mate beïnvloed door de vegetatie. State-of-the-art methodieken proberen de invloed hiervan te beperken (bijvoorbeeld Sadeghi et al., (2017)), maar het is lastig om het effect van vegetatie weg te filteren.

Wanneer een evolutie in de tijd geanalyseerd wordt, kan de groei van de vegetatie een bijkomende factor zijn die de bodemvochtschatting beïnvloedt. Bij gebruik van optische data kan een bijkomende schatting van de vegetatie (bijvoorbeeld met een vegetatie-index zoals NDVI) dit kwantificeren.

Besluit

Voor gelijkaardige percelen met ongeveer dezelfde condities met en zonder drainage is er potentieel om via een eenvoudige analyse van de evolutie van bodemvocht te detecteren waar er drainage aanwezig is.

In het algemene geval, voor percelen met heterogene eigenschappen, is dit niet meer mogelijk, tenzij er gebruik wordt gemaakt van bijkomende informatie over de percelen.

Die extra informatie is essentieel. Dit is meteen de reden waarom er in de meeste studies in de literatuur methoden worden voorgesteld die een combinatie maken van remote sensing en GIS data via Machine Learning-technieken (bijvoorbeeld van Møller et al., 2018 Cho et al., 2019).

2.2.2 Patroondetectie op VHR-beelden

Een derde mogelijke methodiek voor het in kaart brengen van ondergrondse kunstmatige drainagesystemen maakt gebruik van zeer hoge-resolutie (Very High Resolution, VHR) satellietbeelden, geleverd door commerciële satellieten zoals Pléiades Neo (Airbus) of de WorldView-constellatie (Maxar), in combinatie met Machine Learning (ML)-algoritmen.

In vergelijking met publiek-beschikbare satellietdata, zoals Sentinel-beelden, verschillen commerciële satellietdata aanzienlijk op het vlak van ruimtelijke resolutie, beeldbreedte (swath width), temporele frequentie en beschikbaarheid van gegevens.

Ten tweede is de beeldbreedte van commerciële satellieten beperkter in vergelijking met publieke satellietdata, omdat hoge resolutie vaak gepaard gaat met een beperking in beeldbreedte. Sentinel-satellieten leggen doorgaans brede stroken vast (bijvoorbeeld Sentinel-2 heeft een beeldbreedte van 290 km), wat het mogelijk maakt om in één keer grote gebieden te dekken. Commerciële satellieten zoals WorldView of Pléiades daarentegen bestrijken smallere stroken (meestal minder dan 20 km), wat hun efficiëntie bij het in kaart brengen van grote regio's kan beperken.

Belangrijk om op te merken is dat de revisiting time sterk varieert naargelang het commerciële belang van een gebied. Gebieden met strategische of economische waarde, zoals regio's met kritieke infrastructuur, oorlogszones of gebieden getroffen door natuurrampen, krijgen prioriteit en worden frequenter geobserveerd, soms zelfs meerdere keren per dag. Daarentegen worden gebieden met weinig commerciële waarde minder frequent of zelfs slechts sporadisch in beeld gebracht. Dit is het gevolg van de beperkte capaciteit om gegevens vanaf de satelliet naar de grondstations te verzenden: commerciële operatoren maken daarbij logische keuzes en richten zich op zones waar beelden effectief verkocht worden. Bijgevolg zijn commerciële datasets niet noodzakelijk representatief of volledig beschikbaar voor elke locatie ter wereld.

Tabel 2 vat de verschillen samen tussen open satellietdata (bv.: Sentinel-2) en commerciële satellietdata (bv.: WorldView):

Volgens de studies zijn er specifieke voorwaarden nodig om drainagebuizen vlot te kunnen identificeren op VHR-satellietbeelden. Deze voorwaarden zijn vrij gelijkaardig als voor de karteringsmethodiek op basis van publieke data. Meer bepaald moeten de beelden zijn genomen:

- Deze strikte voorwaarden verkleinen het aantal beelden dat effectief geschikt is om drainagebuizen te detecteren. In Breitskopf et al., (2022) en Woo et al., (2023) kwamen de satellietdata van Google Earth, dat slechts voor een beperkt aantal data per jaar beelden aanbiedt

en slechts op specifieke locaties (voornamelijk de VS), wat niet noodzakelijk het geval is voor Vlaanderen.

De oplossing is dan om gebruik te maken van platformen van commerciële satellietbedrijven die toelaten om beschikbare archiefbeelden te doorzoeken voor een specifiek interessegebied (Area of Interest, AOI) en datum. Deze AOI en datum moeten geselecteerd worden op basis van de drie hierboven vermelde criteria. Zoals hierboven beschreven bevat dergelijk archief vooral beelden voor 'commercieel relevante' regio's waar veel beelden voor beschikbaar zijn. Archiefbeelden worden meestal op aanvraag verzameld en zijn daarom vaak niet beschikbaar voor de gewenste datum of locatie.

Als er geen relevante archiefbeelden gevonden kunnen worden – of om na te gaan wat mogelijk is met meer geschikte data – is het mogelijk om een satelliet te “tasken”, d.w.z. om beelden vooraf te bestellen voor de nabije toekomst (bijv. binnen twee dagen). Dit kan een geschikte oplossing zijn, mits aan de drie vereisten om drainagebuizen te detecteren is voldaan, wat geen evidentie is. Dergelijke tasking van satellieten gaat uiteraard gepaard met kosten.

De volgende stappen met betrekking tot VHR-beelden bestaan erin om specifieke data en gebieden in Vlaanderen aan te wijzen die voldoen aan de voorwaarden voor het detecteren van drainagebuizen, en vervolgens te bekijken welke VHR-beelden beschikbaar zijn.

2.3 INITIATIEVEN UIT DE GRIJZE LITERATUUR: NATIONALE DRAINAGE-INVENTARISATIES

Ter volledigheid wordt in deze literatuurstudie ook nog dieper ingegaan op enkele interessante studies uit de grijze literatuur. Daarbij focussen we op enkele interessante rapporten uit Nederland en Frankrijk waar ook al pogingen ondernomen zijn om ondergrondse, kunstmatige drainagesystemen op nationale schaal in kaart te brengen op basis van administratieve data.

Buisdrainagekaart Nederland:

Een goed voorbeeld van grijze literatuur waarin een data-gedreven aanpak voor de kartering van ondergrondse drainage wordt toegepast, is de studie van Massop & Schuiling (2016). In dit onderzoek werd een landelijke kaart van buisdrainage voor Nederland opgesteld op basis van bestaande administratieve bronnen. De kern van de methodologie bestond uit het gebruik van de Nederlandse landbouwmetingen van 2012, waarin landbouwers werd gevraagd naar de aanwezigheid van buisdrainage, de gemiddelde draindiepte, en het gebruik van specifieke drainagevormen zoals peilgestuurde systemen of maaiveldgreppels. De gegevens uit deze bevraging zijn beschikbaar op bedrijfsniveau, wat betekent dat ze niet direct aan individuele percelen gekoppeld zijn.

Om toch tot een ruimtelijke kartering op perceelsniveau te komen, werden de bedrijfsgegevens uit de metelling gekoppeld aan de perceleninformatie uit de zogenaamde “Basisregistratie Percelen” (BRP). Via deze koppeling kon het aandeel gedraineerde oppervlakte per bedrijf verdeeld worden over de individuele landbouwpercelen. Daarbij werd niet louter een willekeurige verdeling toegepast, maar werd, waar mogelijk, gebruik gemaakt van aanvullende informatie (zoals bodemkenmerken of historische drainagegegevens) om de toewijzing te verfijnen.

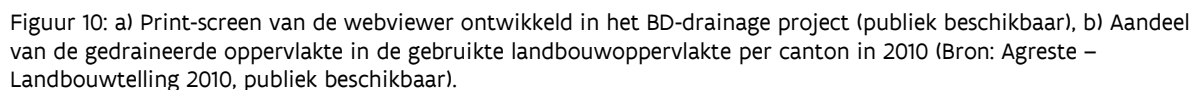
Naast de metingen en BRP-gegevens werd de drainagekaart aangevuld met extra informatie uit andere bronnen. Zo leverden sommige waterschappen kaarten aan met drainagegegevens uit

eigen inventarisaties. Daarnaast werd ook rekening gehouden met andere landgebruiken zoals verstedelijkt gebied en recreatie-gebieden. Deze aanvullende gegevens waren van belang om ook drainage buiten het agrarisch gebruik te kunnen meenemen in de landelijke analyse. De finale kaart is weergegeven in Figuur 9.

Figuur 9: Gedraineerde gebieden op basis van landbouwweittellingen, aangevuld met andere landgebruiksvormen die gedraineerd zijn (Massop & Schuiling, 2016).

Het Franse BDDrainage-project is opgezet als een nationale databank voor de registratie, bewaring en ontsluiting van gegevens over landbouwkundige ondergrondse drainage. Het initiatief kwam voort uit de vaststelling dat drainage-informatie in Frankrijk vaak verspreid, analoog en moeilijk toegankelijk is, wat de ondersteuning van hydrologisch beheer, en ruimtelijke planning belemmert. In een eerste fase werd in de regio Haute-Normandie een haalbaarheidsstudie uitgevoerd, waarbij papieren archieven van regionale overheden, landbouwdiensten en waterbeheerders werden geïnterpreteerd. Op basis daarvan werd een database ontwikkeld voor drainagelijnen, uitlaatpunten, aanlegdata, en technische kenmerken zoals diepte en type buizen. In een tweede fase werd dit datamodel geïmplementeerd in een webtoepassing bestaande uit een invoerportaal en een consultatiemodule waarmee bevoegde instanties (zoals landbouwdiensten of waterschappen) drainagegegevens op perceelsniveau kunnen registreren en beheren. De

Voor een volledig beeld vermelden we dat in Frankrijk het statistiekagentschap Agreste regelmatig landbouwstatistieken publiceert. Op basis van een grootschalige, verplichte landbouwtelling van 2010, werd een kaart geproduceerd die per departement het aandeel landbouwoppervlakte toont dat in 2010 gedraineerd was door een netwerk van ondergrondse buizen. Deze gegevens zijn verzameld door directe bevraging van landbouwers. De kaart is weergegeven in Figuur 10b.



In tegenstelling tot Nederland en Frankrijk worden in Vlaanderen geen centrale statistieken bijgehouden over het gebruik of de verspreiding van ondergrondse drainagesystemen. Historisch gezien is er weinig systematische registratie gebeurd, waardoor de ligging van bestaande drainage-infrastructuur grotendeels een blinde vlek vormt.

Echter, sinds 1 januari 2018 moet dergelijke melding gebeuren via het Omgevingsloket, een tool van de Vlaamse Overheid die het proces van de omgevingsvergunning in Vlaanderen volledig digitaliseert. Wie nu een drainageproject aanlegt of wijzigt, is verplicht om in het digitale aanvraagdossier een geografische afbakening (contour) aan te geven van het betrokken gebied. Deze contouren kunnen worden opgeladen als shapefile of manueel aangeduid worden via een GIS-gebaseerde interface in het loket. Alle ingediende omgevingsaanvragen en meldingen worden

Figuur 12 illustreert dat de verschillende methodieken elk op een verschillend schaalniveau werken. GIS-analyses leveren een eerste, ruwe indicatie van mogelijke drainagelocaties op macroschaal (bv. Vlaanderen). Analyse van publieke satellietbeelden laat toe om deze inschatting te verfijnen op regionaal (1-100 km²) tot perceelsniveau door variaties in bodemvocht en vegetatie op te sporen. Ten slotte maken zeer hoog-resolutiebeelden (VHR) het mogelijk om drainagepatronen met grote nauwkeurigheid te detecteren op perceelsniveau.



pagina 28 van 94

Tabel 3: Overzicht van de evaluatie-criteria van de verschillende methodieken.

	GIS-methodieken		Drainagedetectie op basis van publieke satellietbeelden		Patroondetectie op VHR-beelden	
Complexiteit	Relatief eenvoudige methodiek waarbij verschillende GIS-lagen gecombineerd worden. GIS-kennis vereist.	++	Gemiddeld: eenvoudige principes, maar details en verificatie vragen extra aandacht.	++	De methodologie op basis van AI-modellen vereist specifieke kennis en infrastructuur.	--
Nauwkeurigheid	Lage nauwkeurigheid. Methodiek resulteert in ruwe inschatting waar drainage vermoedelijk is aangelegd.	--	Betrouwbaarheid goed voor vergelijkbare percelen. Combinatie met GIS-data nodig voor uitbreiding naar alle percelen.	+	Relatief hoge nauwkeurigheid bij het detecteren van drainagebuizen.	++
Ruimtelijke resolutie	Afhankelijk van gebruikte input-kaarten (tussen de 5-100 m).	5-100m	Optische data 10m, radar data mogelijk lager omwille van ruis.	10m-100m	Gebruik van zeer hoge-resolutie satellietbeelden.	0.3 m
Tijdsinvestering (voor uitvoering op Vlaamse schaal)	Zeer laag, 1-5 dagen werk.	++	Beperkte ontwikkeling voor eenvoudig model, operationeel robuust maken vraagt meer tijd.	--	Tijd nodig om geschikte satellietbeelden te verzamelen voor heel Vlaanderen (indien beschikbaar).	--
Kosten	GIS-lagen zijn vrij en publiek beschikbaar.	++	Satellietbeelden, sommige bodemvochtproducten en weerdata vrij beschikbaar.	++	Het bestellen van beelden is vereist en brengt kosten met zich mee.	--
Toepasbaarheid op perceelsniveau	Methodiek weinig zinvol op perceelsniveau.	--	Perceel ideale schaal om de methode toe te passen.	++	AI getraind AI-model beschikbaar voor testen, maar niet gekalibreerd op Vlaamse context.	++
Toepasbaarheid op Vlaamse schaal	Methodiek makkelijk toepasbaar op Vlaamse schaal.	++	Automatisatie op grotere schaal vraagt bijkomende ontwikkeling (bv. lokale neerslagmodellen).	--	AI-model is gemakkelijk aanpasbaar voor grotere gebieden, het aantal beelden met geschikte condities voor detectie is beperkt.	--

3 OPSTELLEN VAN EEN INVENTARIS VAN GEDRAINEERDE PERCELEN VOOR VLAANDEREN

In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe een inventaris van ondiepe ondergrondse drainage in Vlaanderen werd samengesteld. Deze inventaris vormt de basis waarop in het volgende hoofdstuk verschillende detectiemethodieken worden getest en gevalideerd. De inventaris is opgebouwd op basis van drie bronnen: 1) administratieve gegevens uit het Omgevingsloket met vergunnings- en meldingsdossiers, inclusief geografische contouren, 2) “grijze” literatuur met ruimtelijke informatie over gedraineerde percelen en 3) gerichte bevraging van relevante instanties, zoals landbouworganisaties, regionale landschappen en overheidsdiensten met potentieel relevante data.

In een tweede deel wordt een ruimtelijke analyse uitgevoerd waarin de inventaris wordt gekoppeld aan verschillende kaartlagen om de ruimtelijke patronen van ondergrondse drainage beter te begrijpen. Tot slot wordt nog dieper ingegaan op de representativiteit van de inventaris, een belangrijk aandachtspunt omdat deze in het volgende hoofdstuk als referentie dient voor de evaluatie van de verschillende karteringsmethodieken.

3.1 DATASET OMGEVINGSLOKET

Een eerste en belangrijke bron voor de opbouw van de databank is het Omgevingsloket. Deze databron biedt een overzicht van recent aangelegde of aangepaste drainagesystemen in Vlaanderen en vormt daardoor een belangrijke databron voor de inventarisatie. In paragraaf 2.3 gingen we reeds dieper in op de dataset van gedraineerde percelen in het Omgevingsloket. De huidige dataset (informatie opgevraagd op 15/10/2025) omvat 472 projecten (aanvragen en meldingen) verdeeld over 568 percelen, waarbij één project meerdere percelen kan omvatten.

Figuur 13 toont de ruimtelijke spreiding van de percelen (centroïde per perceel) in het Omgevingsloket onder rubriek 53.3. Van de 568 percelen vallen er 328 onder de rubriek 'aanvraag omgevingsproject' en 238 onder de rubriek 'Melding omgevingsproject'. Merk op dat twee percelen 'vraag tot omzetting milieu-vergunning' als projecttype hebben (slechts 1 locatie zichtbaar met rode bol op Figuur 13 doordat tweede locatie bedekt wordt door andere projecten).

3.4 SAMENBRENGEN DATABRONNEN EN RUIMTELIJKE ANALYSE

Om de informatie uit de verschillende databronnen beter te kunnen interpreteren, wordt in het volgende onderdeel een ruimtelijke analyse uitgevoerd op de samengestelde inventaris. Hierbij wordt de inventaris van gedraineerde percelen gekoppeld aan verschillende omgevingsvariabelen, zoals bodemkenmerken, landgebruik, helling en grondwaterdiepte. Op die manier kan worden onderzocht onder welke fysisch-landschappelijke omstandigheden ondergrondse kunstmatige drainage vooral voorkomt.

Figuur 14 geeft een overzicht van de relatie tussen de inventaris van gedraineerde percelen en drie fysisch-landschappelijke variabelen: grondwaterdiepte, helling en topografische positie (TPI). De bovenste rij toont telkens de geografische spreiding van de percelen op de bijhorende kaartlaag, terwijl de onderste rij de verdelingspatronen weergeeft in de vorm van histogrammen, voor zowel alle pixels over heel Vlaanderen als enkel voor de gedraineerde percelen.

Uit de vergelijking van de histogrammen blijkt dat de grondwatertafels bij de gedraineerde percelen gemiddeld ondieper zijn, dan voor Vlaanderen als geheel. Dit duidt erop dat drainage vooral wordt toegepast in gebieden met een relatief hoge grondwatertafel, waar wateroverlast in het groeiseizoen kan optreden. Ook voor de helling is een duidelijk patroon zichtbaar: de meeste gedraineerde percelen liggen in vlakke zones met een hellingsgraad kleiner dan 2%, terwijl in het Vlaamse totaalbeeld ook meer reliëfrijke gebieden voorkomen.

De topografische index (TPI) is het verschil tussen de hoogteligging van een locatie in vergelijking met de gemiddelde hoogteligging van de omgeving rond die locatie. De TPI toont in hoeverre bodems ontwateren door een relatief hogere ligging of juist zeer nat blijven door een relatief lagere. Voor de TPI is het verschil tussen de inventaris en de volledige Vlaamse dataset daarentegen minder uitgesproken. Zowel de mediaanwaarden als de verdeling zijn sterk vergelijkbaar, wat erop wijst dat drainage niet systematisch vaker voorkomt in dalzones of depressies. Op Vlaams schaalniveau lijkt TPI dus geen onderscheidende factor te zijn voor het voorkomen van ondergrondse drainage.

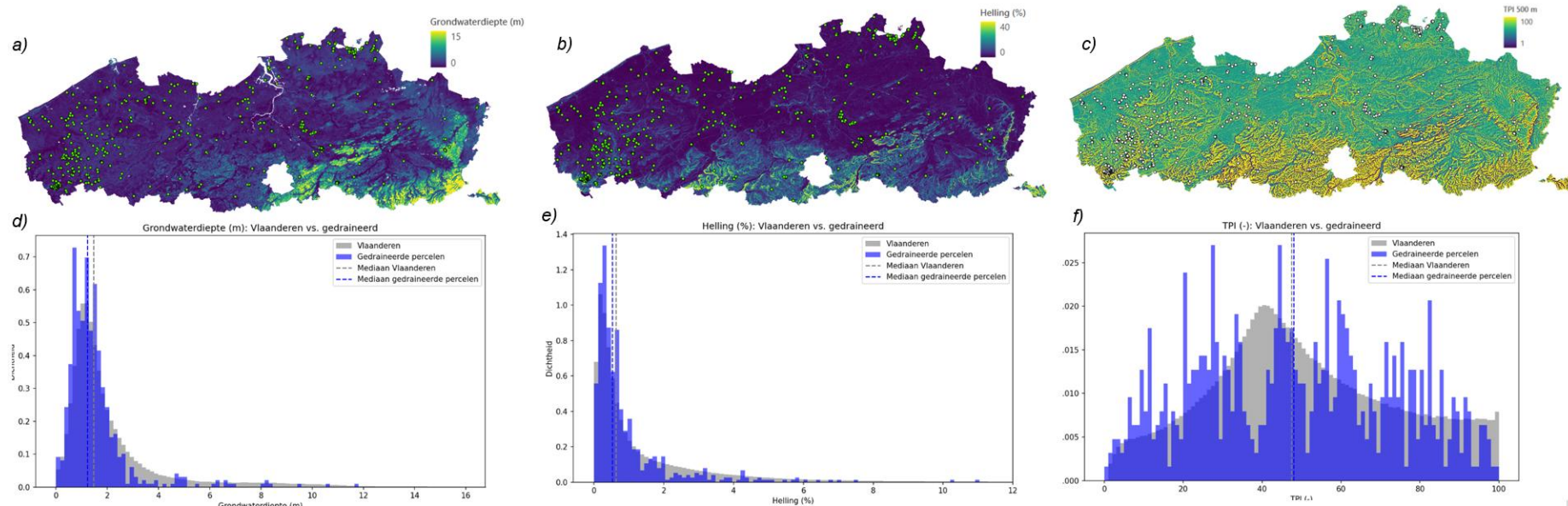
Bijgevolg wordt drainage duidelijk beïnvloed door grondwaterdiepte en topografie (helling), maar niet in dezelfde mate door de relatieve landschapspositie (TPI).

Figuur 15 toont de ruimtelijke verdeling van de gedraineerde percelen in relatie tot drie categorische variabelen: drainageklasse, landgebruik en landbouwgebruikspercelen. De kaarten op de bovenste rij illustreren telkens de ligging van de percelen op de bijhorende thematische lagen, terwijl de grafieken op de onderste rij de verdeling van de inventaris per categorie weergeven.

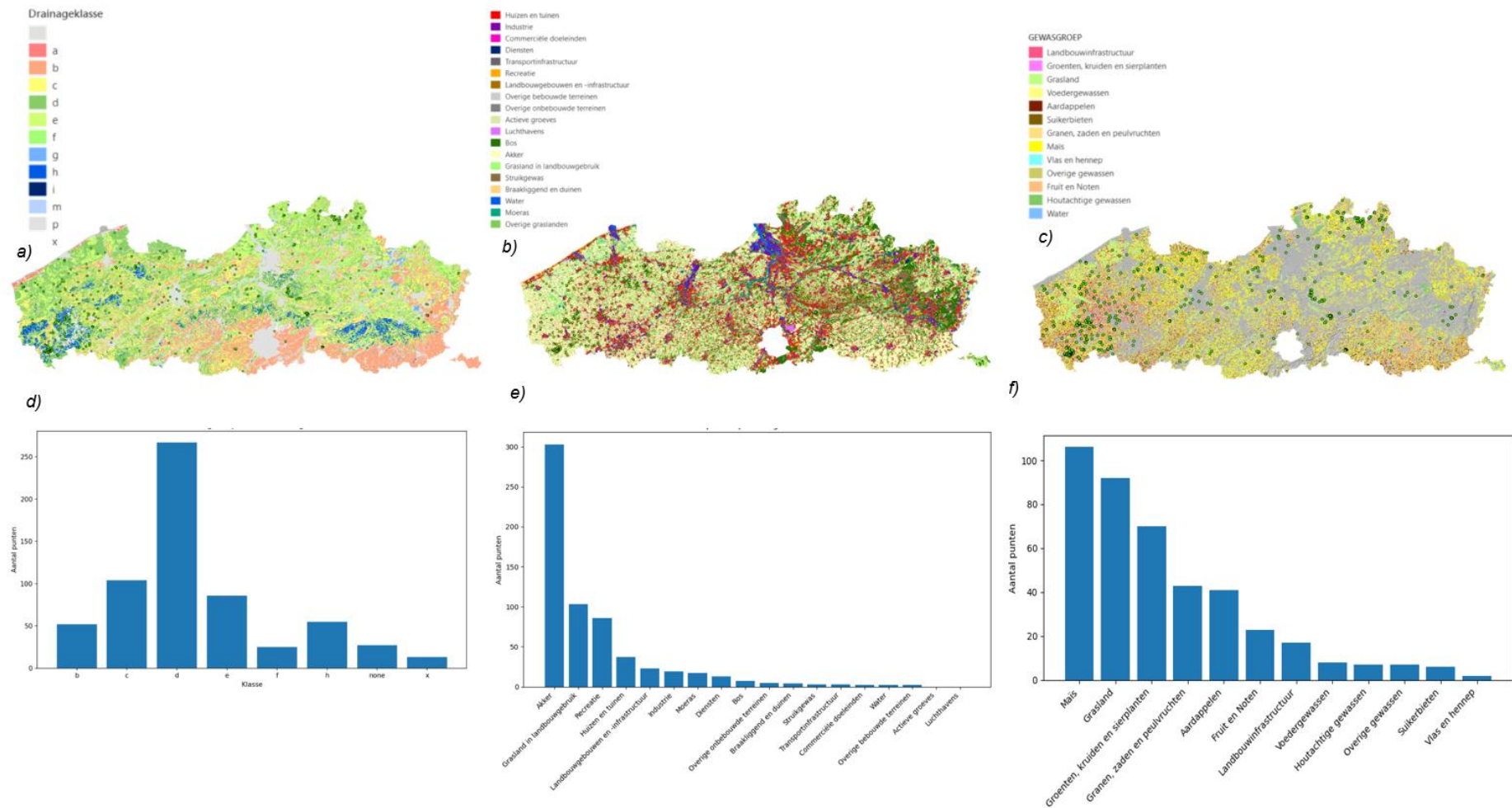
Voor de drainageklassen (Figuren 15 a en d) blijkt dat het merendeel van de gedraineerde percelen zich situeert in bodems met een matige tot slechte natuurlijke afwatering. Vooral de klassen c (matig droge, zwak gleyige bodems en d (matig nat, matig gleyig) zijn dominant vertegenwoordigd. Merk op dat de dataset geen gedraineerde percelen bevat op bodems met drainageklasse a. Deze verdeling bevestigt dat drainage vooral wordt toegepast in bodems waar water van nature slecht infiltreert.

De analyse van het landgebruik (Figuren 15 b en e) toont dat drainage hoofdzakelijk voorkomt in landbouwgebieden, terwijl het aandeel in niet-agrarisch of bebouwd gebied beperkt blijft.

Samenvattend tonen deze drie analyses dat ondergrondse kunstmatige drainage in Vlaanderen vooral voorkomt op vochtige bodems met beperkte natuurlijke afwatering, binnen landbouwkundig intensief gebruikte gebieden en bij teelten die sterk afhankelijk zijn van een goed gereguleerde waterhuishouding.



Figuur 14: Ruimtelijke spreiding van de inventaris, samen met relevante kaartlagen: (a) Grondwaterdieptekaart met de ligging van gedraineerde percelen (groen), (b) hellingkaart, en (c) Topographic Position Index (TPI) op 500 m resolutie. De histogrammen onderaan tonen telkens de verdeling voor Vlaanderen als geheel (grijs) en voor de gedraineerde percelen uit de inventaris (blauw): (d) grondwaterdiepte, (e) helling, en (f) TPI.



Figuur 15: Relatie tussen de inventaris van gedraineerde percelen en drie categorische omgevingsvariabelen in Vlaanderen. (a) Ruimtelijke ligging van gedraineerde percelen op de drainageklassenkaart; (b) ligging op de kaart van landgebruikscategorieën; en (c) ligging op de Landbouwgebruikspercelen. De grafieken onderaan tonen telkens het aantal gedraineerde percelen in de inventaris per categorie: (d) drainageklassen, (e) landgebruikscategorieën, en (f) landbouwgebruikspercelen.

4 KARTERING VAN ONDERGRONDSE DRAINAGE IN VLAANDEREN: TEST-CASES

In dit hoofdstuk worden verschillende methodieken getest om ondergrondse kunstmatige drainage in Vlaanderen in kaart te brengen. De keuze voor deze methoden sluit aan bij de bevindingen uit de literatuurstudie, waarin een meerlagige benadering werd voorgesteld: van een brede, GIS-gebaseerde analyse op Vlaams niveau, over de inzet van publiek beschikbare satellietdata om bodemvochtpatronen te analyseren, tot detaildetectie op perceelsniveau met zeer hoge resolutie (VHR) beelden.

De geselecteerde methodieken in deze voorstudie hebben niet als doel het opstellen van een volledige drainagekaart voor Vlaanderen, maar trachten een beeld te geven van het potentieel en beperkingen van elk van de drie benaderingen wanneer toegepast op schaal Vlaanderen.

Eerst wordt een GIS-methodiek toegepast, waarbij verschillende ruimtelijke variabelen worden gecombineerd om zones met een hoge kans op drainage te identificeren. Vervolgens wordt onderzocht of publieke satellietdata (Sentinel-data) verschillen in bodemvochtgedrag kunnen detecteren tussen gedraineerde en niet-gedraineerde percelen. Ten slotte wordt geëvalueerd of VHR-data in staat zijn om drainagepatronen te observeren op satellietdata in een Vlaamse context.

De inzichten uit deze analyses vormen de basis voor het volgende hoofdstuk (roadmap), waarin aanbevelingen worden geformuleerd voor een mogelijke verdere uitrol van drainagedetectie op Vlaamse schaal.

4.1 GIS-METHODIEKEN: OPSTELLEN VAN EEN DRAINAGE-VERMOEDENSKAART

4.1.1 Methodologie

Context en relevante variabelen

Voor het uitvoeren van de GIS-analyse wordt vertrokken vanuit de inventaris met 628 datapunten. Gelijkaardig aan de methodes beschreven in de literatuurstudie (sectie 2.1) wordt getracht om verschillende GIS-lagen die indicatief zijn voor de aanwezigheid van ondiepe drainage te combineren. Dit maakt het mogelijk om een eerste inschatting te maken van welke gebieden (in Vlaanderen) vermoedelijk gedraineerd zijn.

Dergelijke combinatie van kaartlagen kan gebeuren via eenvoudige optelling van kaarten via een score-systeem of via een decision tree-classificatie, waarbij gebieden op basis van specifieke criteria als waarschijnlijk gedraineerd worden geclassificeerd. Relevante inputkaarten bevatten informatie met betrekking tot bodemkenmerken, grondwaterdiepte en topografie. In het kader van deze test-case zullen verschillende GIS-lagen gecombineerd worden via een logistisch regressie-model (zie verder). Tabel 4 toont de variabelen die in de opbouw van het logistisch regressie-model zijn meegenomen.

De vier scenario's worden hieronder samengevat:

- Scenario 1

Criteria:

- Helling > 5%
- GHG (gemiddeld hoogste grondwatertand) > 1 m
- Bodemdrenageklasse A–B

In dit eerste scenario werd gekozen voor strikte criteria die fysische omstandigheden afbaken waarin drainage hydrologisch weinig relevant is. Percelen met een diepe grondwatertafel, een goed drainerende bodem en een uitgesproken helling hebben doorgaans weinig behoefte aan ondergrondse drainage. Hoewel deze aanpak inhoudelijk verdedigbaar is, leidt ze in de praktijk tot een sterke clustering van geselecteerde punten in heuvelachtige gebieden, wat de ruimtelijke representativiteit van deze referentieset beperkt (zie Figuur 16a)

- Scenario 2

Criteria:

- Helling > 1%
- GHG (gemiddeld hoogste grondwaterniveau) > 1 m

Om de ruimtelijke clustering uit scenario 1 te beperken, werd het hellingscriterium versoepeld. Hierdoor worden ook percelen met een beperkte helling meegenomen, wat resulteert in een evenwichtigere spreiding over Vlaanderen. De criteria blijven echter gebaseerd op dezelfde fysische variabelen die ook als modelinput worden gebruikt. Dat betekent dat de referentieset in dit scenario niet volledig onafhankelijk is van de regressievariabelen, wat een aandachtspunt vormt bij de interpretatie van de resultaten.

- **Scenario 3**

Criteria:

- Doorgrondkaart: oranje gronden

In dit scenario werd geopteerd voor een externe databron als selectiecriteria. De Doorgrondkaart (zie extra duiding in box 1) is ontwikkeld op basis van een apart model en geeft inzicht in de fysische werking van het landschap. De zogenaamde oranje gronden hebben bodems met een hoge infiltratie-capaciteit, liggen hoog in het landschap en hebben een dikke watervoerende laag. In het kader van dit scenario werden de oranje gronden ook beschouwd als locaties waar drainage het minst aannemelijk is. Het dient echter te worden opgemerkt dat de Doorgrondkaart is opgesteld op basis van o.a. topografische informatie (TPI) en bodemeigenschappen (bodemtextuurklassen) wat ervoor zorgt dat ook de Doorgrondkaart niet als volledig onafhankelijk criterium kan beschouwd worden.

- *Scenario 4*

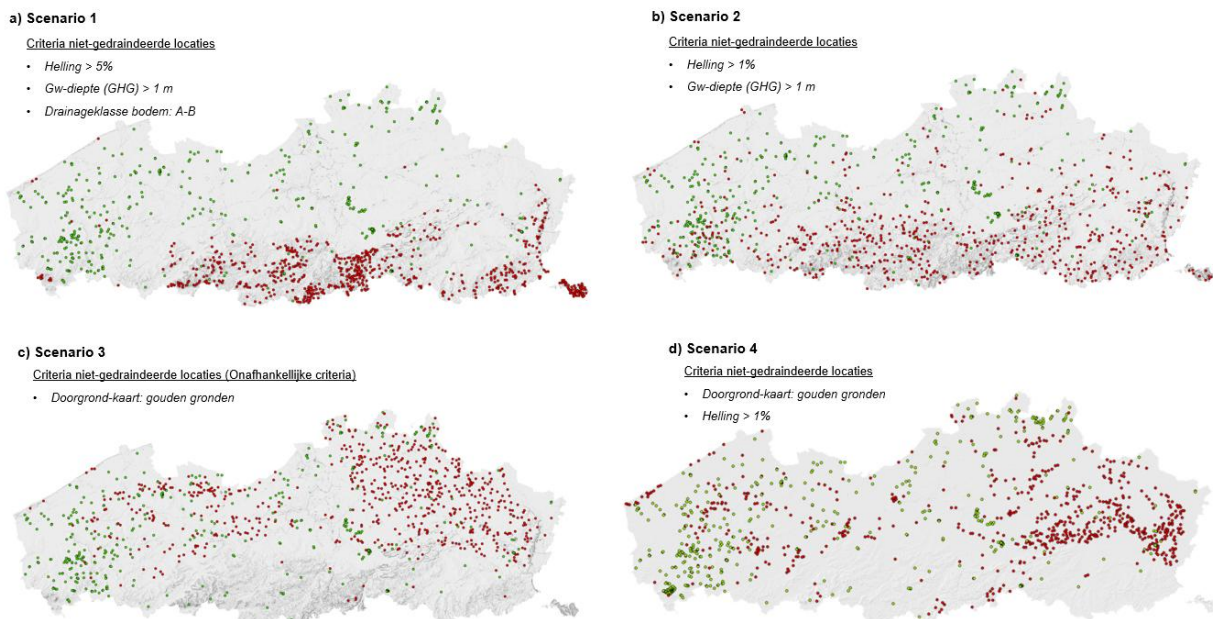
Criteria:

- Doorgrondkaart: oranje gronden
- Helling > 1%

In Scenario 4 worden de niet-gedraineerde locaties ook geselecteerd op de 'oranje gronden' van de Doorgrondkaart, maar enkel op locaties waar de helling ook hoger is dan 1%. Dit is verdedigbaar aangezien drainage in de praktijk slechts zelden op hellende gebieden wordt

toegepast. Deze set van criteria zorgt voor een goede ruimtelijke spreiding van gedraineerde en niet-gedraineerde locaties zoals weergegeven op Figuur 16d.

Elk scenario resulteerde in een alternatieve dataset met niet-gedraineerde percelen. Deze vier datasets, zoals weergegeven in Figuur 16, werden vervolgens afzonderlijk gecombineerd met de gekende gedraineerde percelen, waardoor vier varianten van de inputdataset ontstonden. Voor elk van deze combinaties werd een apart logistisch regressiemodel opgesteld. Dit maakte het mogelijk om de robuustheid van de resultaten te evalueren en te bepalen in welke mate de aannames over niet-gedraineerde percelen de modeluitkomsten beïnvloed hadden.



Figuur 16: Locatie van gedraineerde (groen) en niet-gedraineerde locaties (rood) voor de vier verschillende criteria.

Vlaanderen krijgt steeds vaker te maken met droogte, overstromingen en hittestress. Die klimaatuitdagingen hangen nauw samen met hoe het landschap en de ondergrond water vasthouden, afvoeren of bufferen. Het is ook algemeen bekend dat Vlaanderen in grote mate verhard is en onthardingsmaatregelen aangewezen zijn om meer hemelwater in de bodem en ondergrond te laten dringen. De wijze waarop water doordringt in het bodem- en ondergrondsysteem is echter niet overal in Vlaanderen dezelfde omdat de samenstelling van bodem en ondergrond variëren. Ook het reliëf is belangrijk. De drie fundamentele fysische componenten om af te leiden hoe makkelijk een regendruppel doordringt in de bodem en ondergrond zijn 1/ de eigenschappen van de bovenste bodemlaag, 2/ de geologische opbouw onder deze bodem en 3/ het reliëf.

DOORGRONDKAART

Hoe makkelijk dringt een regendruppel door in de bodem en ondergrond?

oranje gronden

witte gronden

blauwe gronden

DEPARTEMENT
OMGEVING

Jans, I., et al. (2020). Klimaat
en wat met de grond onder onze
voeten? Rapport in opdracht
van de Vlaamse overheid.
Departement Omgeving. 77p.

Op de oranje, hoger gelegen gronden dringt een
regendruppel makkelijk door in de bodem. De
druppel komt vervolgens in een dikke watervoer-
ende laag terecht, waarna het als grondwater voor een
lange tijd door de ondergrond kan reizen.

Op de witte, heuvelende gronden dringt een regen-
druppel matig door in de bodem. De druppel komt
vervolgens in een gemiddeld dikke watervoer-
ende laag terecht, waarna het als grondwater
voor een middellange tijd door de ondergrond
kan reizen.

Op de blauwe, lager gelegen gronden dringt
een druppel moeilijk door in de bodem.
De druppel komt vervolgens in een dunne
watervoerende laag terecht, waarna het als
grondwater slechts voor een korte tijd door de
ondergrond kan reizen.

OMGEVING
LANDSCAP ARCHITECTUUR - GEBIEDEN

VITO
VLAAMSE OVERHEID
NATUUR

pagina 40 van 94

Opbouw van het model

Voor de analyse werd gekozen voor een logistische regressie, een statistische techniek die de kans voorspelt op een uitkomst in een categorische variabele. In dit geval gaat het om de kans dat een pixel gedraineerd is, op basis van een reeks onafhankelijke verklarende variabelen. Deze aanpak laat toe om de bijdrage van individuele variabelen te kwantificeren en hun invloed op de kans op drainage te interpreteren. Er werd bewust niet gekozen voor een machine learning model zoals Random Forest of Gradient Boosting. De dataset was relatief beperkt in omvang, waardoor het risico op overfitting te groot zou worden bij het gebruik van meer complexe algoritmes. Bovendien biedt de logistische regressie een transparanter en beter controleerbaar model, wat essentieel was om voldoende inzicht te krijgen in de onderliggende relaties en de nuances tussen de verklarende variabelen goed te kunnen interpreteren.

Per scenario werden er 100 simulaties uitgevoerd waarbij telkens 80% van de dataset werd gebruikt voor de kalibratie van het model en 20% voor de validatie. Op die manier kon de stabiliteit van de resultaten worden getest en de robuustheid van de voorspellingen worden beoordeeld.

Alle invoervariabelen werden gestandaardiseerd, zodat verschillen in schaal of eenheden geen invloed hadden op hun relatieve gewicht in het model. Voor categorische variabelen, zoals de drainageklasse, werden dummyvariabelen opgesteld zodat ze correct konden worden opgenomen in de regressieanalyse. Enkel de statistisch significante variabelen werden behouden in de uiteindelijke modellen. De uiteindelijke output bestaat uit het gemiddelde van de 100 individuele regressie-analyses, wat zorgt voor een gebalanceerde en betrouwbare schatting van de kans op drainage per pixel.

Evaluatie van de modelresultaten

Voor elk van de vier scenario's werd op basis van de 100 simulaties een gemiddelde kanskaart berekend. Voor elke pixel werd het gemiddelde genomen van de voorspelde drainagekansen. Daarnaast werd ook de standaarddeviatie bepaald, zodat de ruimtelijke variatie en de modelonzekerheid in beeld konden worden gebracht.

De prestaties van de modellen werden geëvalueerd aan de hand van twee evaluatie-metrics: 'accuracy' en 'precision'.

- 'Accuracy' geeft aan welk aandeel van alle voorspellingen correct is (zowel gedraineerd als niet-gedraineerd) en wordt berekend als:

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Met TP = True Positives (correct voorspelde gedraineerde percelen), TN = True Negatives (correct voorspelde niet-gedraineerde percelen), FP = False Positives (voorspeld als gedraineerd, maar in realiteit niet gedraineerd) en FN = False Negatives (voorspeld als niet-gedraineerd, maar in realiteit wel gedraineerd).

- 'Precision' kijkt specifiek naar de positieve voorspellingen en geeft aan welk deel daarvan effectief overeenkomt met gedraineerde locaties. Met andere woorden: hoe correct is de set voorspelde drainagepunten?

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Beide metrics werden berekend door de voorspelde kaarten te vergelijken met de bekende gedraineerde en niet-gedraineerde locaties uit de datasets van de vier scenario's. Door de accuracy en precision van de scenario's te vergelijken, samen met de ruimtelijke patronen en onzekerheidskaarten, kon worden beoordeeld welke scenario's de meest stabiele en betrouwbare resultaten opleverden.

4.1.2 Resultaten

Drainage-vermoedenskaart

De onderstaande kaarten op Figuur 17 tonen de gemiddelde voorspelde kans op drainage voor elk van de vier scenario's. Voor elke pixel werd het gemiddelde berekend van de 100 simulaties per scenario. De kaarten moeten worden geïnterpreteerd als *modelmatige drainagevermoedenskaarten*, niet als een exacte weergave van de werkelijke drainage. Ze geven inzicht in hoe de aannames achter de selectie van niet-gedraineerde percelen het ruimtelijke patroon van de voorspelde drainage beïnvloeden. De vier scenario's vertonen duidelijke verschillen:

- **Scenario 1**

Dit scenario leidt tot een zeer binair beeld: grote delen van Vlaanderen worden met hoge waarschijnlijkheid als gedraineerd geclassificeerd, terwijl enkel uitgesproken steile gebieden lage kansen krijgen. Dit komt rechtstreeks voort uit de selectiecriteria, waarbij niet-gedraineerde referentiepunten vooral op steile hellingen werden gekozen. Hierdoor “leert” het model dat helling vrijwel de enige onderscheidende factor is. Het resultaat is een weinig realistisch patroon, gedomineerd door topografie, met weinig nuance tussen verschillende drainageklassen.

- Scenario 2

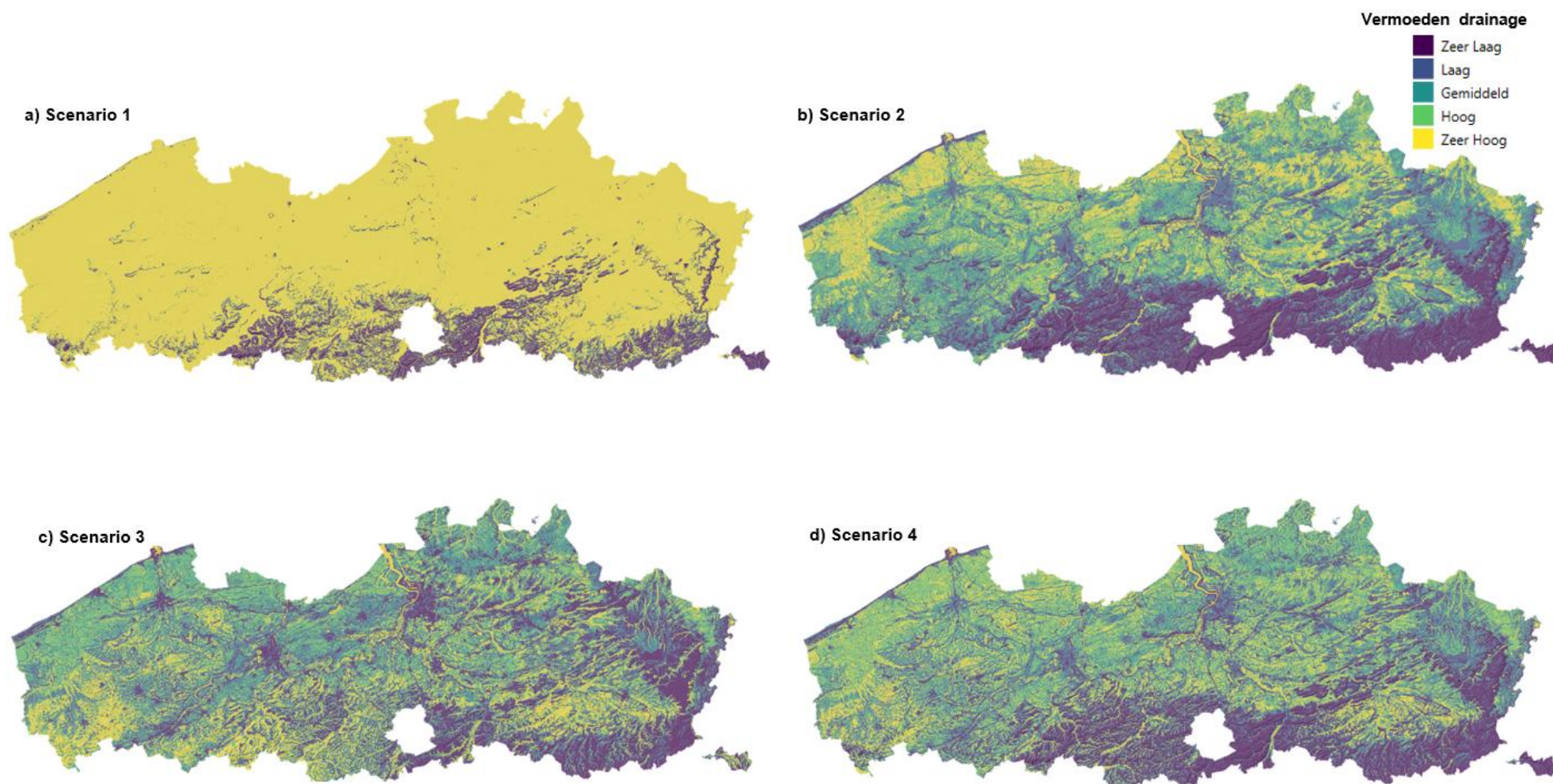
In dit scenario werd de selectie versoepeld, waardoor de niet-gedraineerde punten ruimtelijk beter verspreid zijn. Dit zorgt voor een veel genuanceerder drainagepatroon. Vooral vlakke gebieden springen eruit met hoge kansen, zoals de polderregio's en de beek- en riviervalleien in de Kempen. Zones met meer reliëf kleuren overwegend blauw, wat wijst op een lagere kans op drainage. De patronen sluiten beter aan bij de gekende hydrologische realiteit.

- Scenario 3

Doordat in dit scenario een onafhankelijke variabele werd gebruikt voor de selectie van niet-gedraineerde percelen (de doorgrondkaart), is het effect van helling veel minder uitgesproken. Het model plaatst hogere drainagekansen vooral in gebieden met slecht drainerende bodems (bv. regio's met drainageklasse h, zoals West-Vlaanderen en vochtig Haspengouw). De ruimtelijke patronen worden hier meer gedomineerd door bodemkarakteristieken en grondwaterdiepte (GHGs).

- **Scenario 4**

Door in dit scenario de doorgrondkaart te combineren met een hellingscriterium, komt helling opnieuw sterker naar voren. Vlakke gebieden kleuren overwegend geel (hogere drainagekans), terwijl meer heuvelachtige regio's blauw kleuren. Dit scenario weerspiegelt dus opnieuw een topografisch gestuurd patroon, maar minder extreem dan in Scenario 1. Grondwaterdiepte speelt eveneens een rol, maar minder zichtbaar in het globale ruimtelijke beeld.



Figuur 17: De drainage-vermoedenskaarten voor de vier afgebakende scenario's. Voor elk scenario is de gemiddelde drainage-kans berekend per pixel op basis van de 100 simulaties.

Relatief belang van de variabelen

Figuur 18 toont voor elk scenario de gemiddelde coëfficiënten van de ruimtelijke variabelen in het regressiemodel. De coëfficiënten geven aan hoe sterk en in welke richting een variabele bijdraagt aan de voorspelde drainagekans. Positieve waarden verhogen de kans op drainage; negatieve waarden verlagen die. De vier scenario's verschillen sterk in welke variabelen dominant zijn, wat rechtstreeks voortvloeit uit de aannames achter de selectie van niet-gedraineerde percelen.

- **Scenario 1**

In dit scenario zijn enkel helling en grondwaterdiepte statistisch betekenisvol, maar vooral helling springt eruit met een zeer sterke negatieve coëfficiënt. Omdat de niet-gedraineerde locaties hier bijna uitsluitend op steile hellingen liggen, leert het model dat helling de belangrijkste onderscheidende factor is. Dit verklaart waarom de kanskaart een bijna binair patroon vertoont (vlakke gebieden = hoge kans; hellingen = zeer lage kans). Andere variabelen dragen nauwelijks bij, omdat hun spreiding tussen gedraineerde en niet-gedraineerde punten te klein is binnen dit strenge scenario.

- **Scenario 2**

Door de versoepeling van de criteria is de spreiding van de niet-gedraineerde punten ruimtelijk meer gebalanceerd. Helling blijft een sterk negatieve invloed hebben, maar minder extreem dan in scenario 1. Grondwaterdiepte komt hier duidelijk naar voren als een belangrijke tweede variabele: percelen met ondieper grondwater hebben een hogere kans op drainage. Daarnaast worden ook verschillende drainageklassen (bv. klasse d, e, h) statistisch betekenisvol. Hun bijdragen zijn kleiner, maar ze verklaren waarom scenario 2 een meer genuanceerd ruimtelijk patroon oplevert.

- **Scenario 3**

Omdat de niet-gedraineerde percelen in dit scenario gebaseerd zijn op een onafhankelijke bron (doorgrondkaart), is helling niet langer systematisch gekoppeld aan de referentielocaties. Het model verschuift daardoor naar andere verklarende factoren:

- Drainageklasse h heeft een sterke positieve coëfficiënt (hoge kans op aanwezigheid van drainage).
- Grondwaterdiepte blijft belangrijk maar minder uitgesproken.
- TPI (topografische positie-index) speelt een beperkte, maar consistente rol.

Dit leidt tot een kanskaart waarin vooral natte gebieden of slecht drainerende bodems, zoals delen van West-Vlaanderen en vochtig Haspengouw, sterk naar voren komen. Het effect van helling blijft in dit scenario beperkt omdat het geen criterium was in de selectie van de niet-gedraineerde punten.

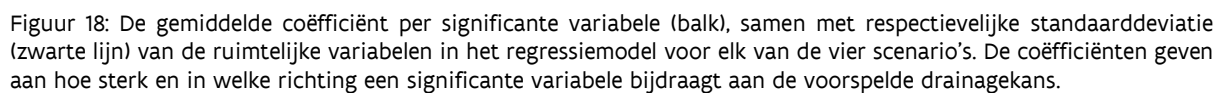
- **Scenario 4**

In scenario 4 wordt de onafhankelijkheid van scenario 3 behouden (selectie op oranje gronden), maar helling wordt opnieuw toegevoegd als extra voorwaarde.

Dit resulteert in een tussenvorm:

- Helling krijgt opnieuw een negatieve coëfficiënt, maar minder sterk dan in scenario 1.
- Drainageklassen (met name klasse h en e) blijven belangrijke positieve voorspellers.
- Grondwaterdiepte blijft eveneens relevant.

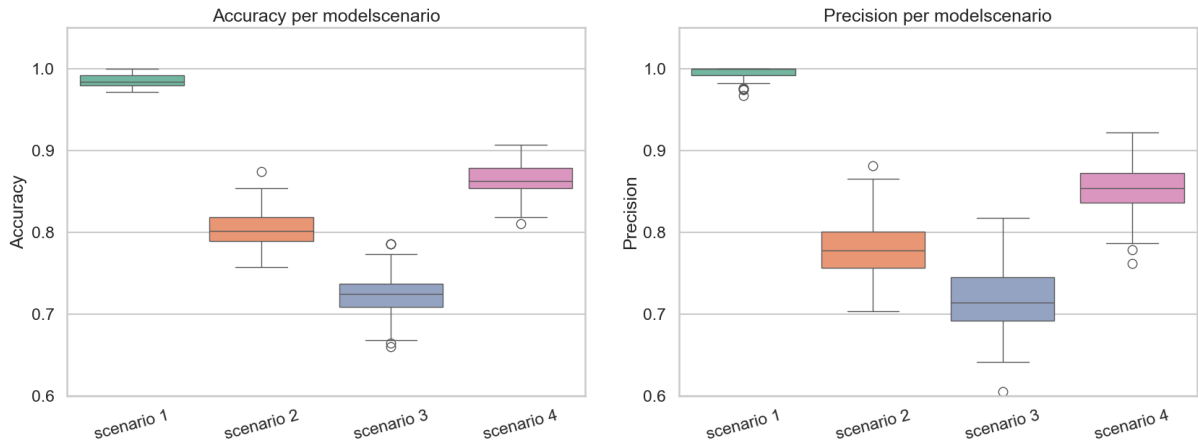
Het model combineert hiermee de informatie uit bodem en topografie, wat resulteert in een drainagepatroon dat zowel natte bodems als vlakke gebieden benadrukt.



De boxplots in Figuur 19 tonen de verdeling van de *accuracy* en *precision* over de 100 simulaties voor elk van de vier scenario's. Hoewel deze evaluatiematrices een indicatie geven van de voorspellende kracht van de modellen, is het belangrijk om de resultaten steeds samen te interpreteren met de ruimtelijke patronen uit de kanskaarten.

- pagina 46 van 94

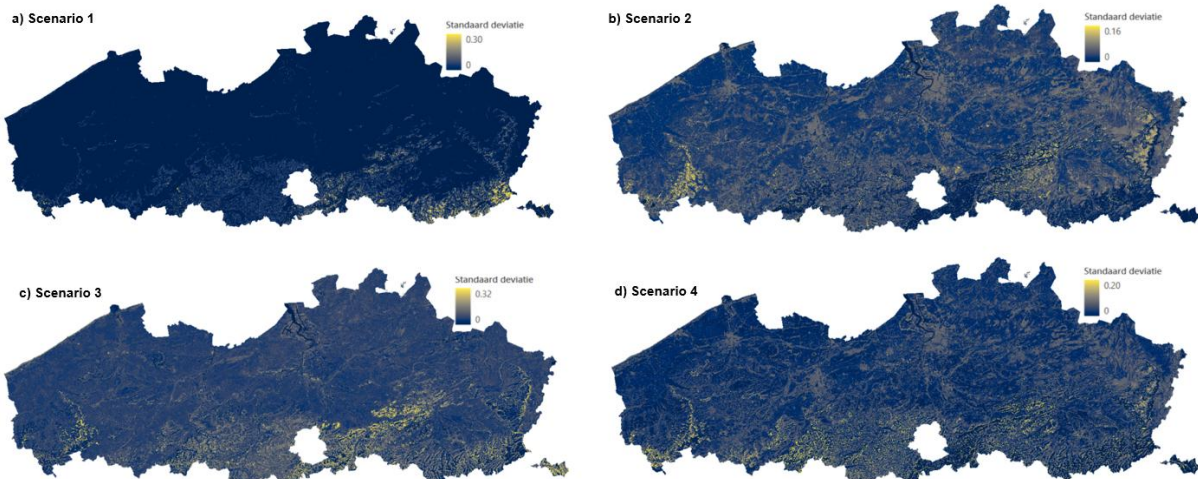
- **Scenario 4** vormt een duidelijk evenwicht tussen de vorige scenario's. De prestaties zijn zowel voor accuracy als precision stabiel en relatief hoog, terwijl de ruimtelijke patronen realistisch en gedetailleerd blijven. Het toevoegen van helling als extra criterium versterkt het onderscheid zonder te vervallen in de overmatige clustering die scenario 1 kenmerkt. Daardoor levert scenario 4 zowel inhoudelijk als statistisch de meest robuuste resultaten op.



Figuur 19: Boxplots (spreiding van de 100 simulaties) van de evaluatie-matrices voor de 4 scenario's.

De onderstaande figuur (Figuur 20) toont de standaarddeviatie van de voorspelde drainagekans per pixel, berekend over de 100 simulaties van elk scenario. De standaarddeviatie is een maat voor de modelonzekerheid:

- **lage waarden** (donkerblauw) wijzen op stabiele, consistente voorspellingen;
- **hogere waarden** (geel) duiden op grotere variatie tussen de 100 simulaties en dus op een grotere onzekerheid



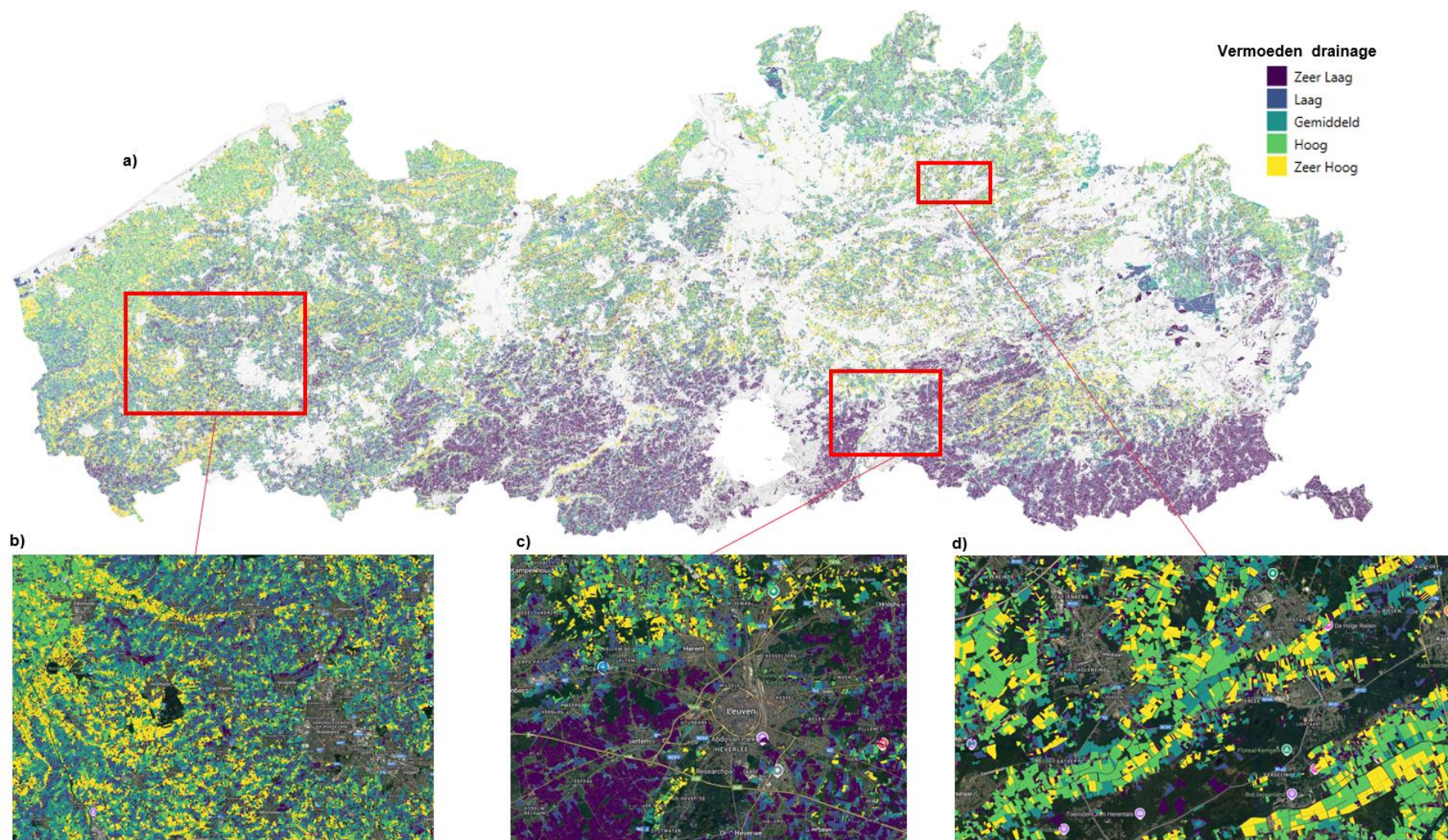
Figuur 20: Standaarddeviatie per pixel op de 100 simulaties voor elk scenario.

De standaarddeviatiekaarten tonen duidelijke verschillen in modelonzekerheid tussen de vier scenario's. Scenario 1 vertoont vrijwel overal zeer lage standaarddeviaties, maar dit is vooral een artefact van de strikte selectiecriteria, waardoor het model telkens hetzelfde hellingsgestuurde patroon reproduceert en dus geen realistische variatie weergeeft. Scenario 2 toont een

4.1.3 Discussie en interpretatie

Om dezelfde reden zijn landbouwgebruikspcelen niet opgenomen als verklarende variabele in het regressiemodel. Het toevoegen van deze categorie, die op zichzelf al in meer dan tien klassen uiteenvalt, zou het aantal vrijheidsgraden sterk vergroten, waardoor geen statistisch betekenisvolle conclusies meer kunnen worden getrokken. De focus lag daarom op een kernset van fysisch-geografische variabelen waarvan bekend is dat ze hydrologisch relevant zijn en voldoende variatie bevatten binnen de beschikbare dataset. Om toch inzicht te bieden in de relatie tussen landgebruik en modelresultaten, werd aanvullend per landbouwgebruikspceel de gemiddelde drainagekans berekend op basis van de resultaten uit scenario 4. Deze analyse wordt weergegeven in Figuur 21. De figuur illustreert dat het, zelfs zonder landgebruik expliciet in het regressiemodel op te nemen, mogelijk is om per perceel een indicatie te verkrijgen van de vermoedelijke drainagestatus op basis van enkel fysische kenmerken.

////////////////////////////////////



Figuur 21: (a) Kaart van Vlaanderen met de gecategoriseerde drainagekans (op basis van scenario 4) per landbouwgebruiksperceel. Deze kaart toont waar, op basis van fysisch-geografische variabelen (grondwaterdiepte, helling, TPI en bodemkenmerken), de waarschijnlijkheid op drainage het grootst is. (b–d) Detailinzichten voor drie voorbeeldregio's (Roeselare, Leuven en regio Kasterlee), waarin de variatie tussen percelen duidelijk zichtbaar wordt. De kaart is opgedeeld in 5 klassen op basis van de 'natural breaks' classificatie, vermoeden drainage = Zeer laag: 0-0.282, Laag: 0.282-0.690, Gemiddeld: 0.690-0.890, Hoog: 0.890-0.957 en Zeer hoog: 0.957-1.00.

4.2.1 Methodologie

Detectieprincipe

- o een droge periode als 'droog' startpunt
- o gevolgd door korte periode van een significante neerslag (zodat het bodemvocht stijgt)
- o daarna een langere droge periode waarin het bodemvocht afneemt, zodat de snelheid van afname een indicatie vormt voor aanwezigheid van drainage.

Peilgestuurde drainage beschouwen als een derde type maakt het complexer om het onderscheid tussen de drainagetypes te maken. Omdat we ons eerst willen concentreren op het iets eenvoudige geval hebben we peilgestuurde drainage in eerste instantie niet meegenomen in de studie.

Bodemvocht schatten via remote sensing beelden is zowel mogelijk met optische beelden als met radarbeelden.

Bodemvochtproducten op basis van radarbeelden hebben typisch een lage spatiale resolutie (om de typische ruis van radarbeelden uit te vlakken) waardoor er niet eenvoudig en accuraat bodemvocht op perceelsniveau kan afgeleid kan worden. Een specifieke methodiek voor radar-gebaseerde bodemvochtschatting op perceelsniveau zou in principe mogelijk zijn, maar dit uitwerken paste niet binnen het kader van deze voorstudie.

In plaats daarvan gebruiken we optische beelden. Hiervoor zijn er wel diverse methoden en afgeleide producten beschikbaar die bodemvochtschattingen geven met een spatiale resolutie die gelijk is aan die van de standaard dataproducten (dus voor Sentinel-2 GSD=10m).

Initieel maakten we gebruik van de NDMI als proxy. Deze is beschikbaar op het Copernicus CDSE platform en geeft een vrij nauwkeurige schatting van bodemvocht voor braakliggende percelen. Hij is echter niet geschikt voor percelen met vegetatie. Aangezien landbouwpercelen in Vlaanderen slechts gedurende zeer beperkte perioden braak liggen, levert dit in de praktijk nauwelijks of helemaal geen bruikbare data op. Dit is zo omdat tegelijk ook een in een geschikt neerslagpatroon moet optreden en er daarenboven ook wolkenvrije satellietbeelden voor de juiste dagen beschikbaar moeten zijn.

Neerslagdata werden verzameld voor de periode van 1 januari 2017 tot 1 augustus 2025, hiervoor werd Waterinfo Vlaanderen¹ als bron gebruikt. Daar werd het meetstation geselecteerd dat het dichtste bij de percelen (gebied Grote Kemmelbeek) ligt, dat was het station Ieper. Data van 2 meetstations in de buurt (Poperinge en Vlamertinge) werden gebruikt om na te gaan of sommige neerslagevents zeer lokaal waren. Als de afwijking tussen de 3 meetstation te groot is, kunnen we ervan uitgaan dat de neerslag lokaal erg varieert, en de data ook niet accuraat zijn om te gebruiken voor de percelen.

- Neerslag van > 5mm per dag in een aansluitende periode van 1 tot 3 dagen
- Voorafgegaan door opname < 8 dagen voor de neerslag
- Gevolgd door minstens opname < 5 dagen na de neerslag
- Gevolgd door nog een opname > 5 tot < 8 dagen na de neerslag

Voor dezelfde periode werd er nagegaan voor welke data er wolkenvrije beelden beschikbaar zijn. Dit werd gedaan door voor een voorbeeldperceel (het gebied van de Grote Kemmelbeek) de tijdsevolutie over de hele periode op te vragen, en dan de 'cloudiness' te gebruiken. De geschikte sequenties met wolkenvrije beelden werden bepaald volgens deze aangepaste regels:

- Neerslag van > 5mm per dag in een aansluitende periode van 1 tot 3 dagen
- Voorafgegaan door een wolkenvrij beeld < 8 dagen voor de neerslag
- Gevolgd door minstens 1 wolkenvrij beeld < 5 dagen na de neerslag
- Gevolgd door nog een wolkenvrij beeld > 5 -< 8 dagen na de neerslag

Beschikbaarheid geschikte data (satellietbeelden en neerslagsequenties)

Wanneer de geschikte neerslagsequenties gezocht worden in de neerslaggegevens, volgens de regels zoals hierboven opgelijst, dan blijken er ongeveer 6 sequenties per jaar voor te komen (het aantal is sterk afhankelijk van hoe strikt de regels worden gesteld). De aantallen per jaar worden getoond in Tabel 5.

Er kan echter alleen gebruik gemaakt worden van de sequenties waarvoor er wolkenvrije opnamen beschikbaar zijn, wat het aantal sterk beperkt. Daarenboven is neerslag uiteraard gecorreleerd met de aanwezigheid van wolken, wat maakt dat geschikte neerslagsequenties

pagina 54 van 94

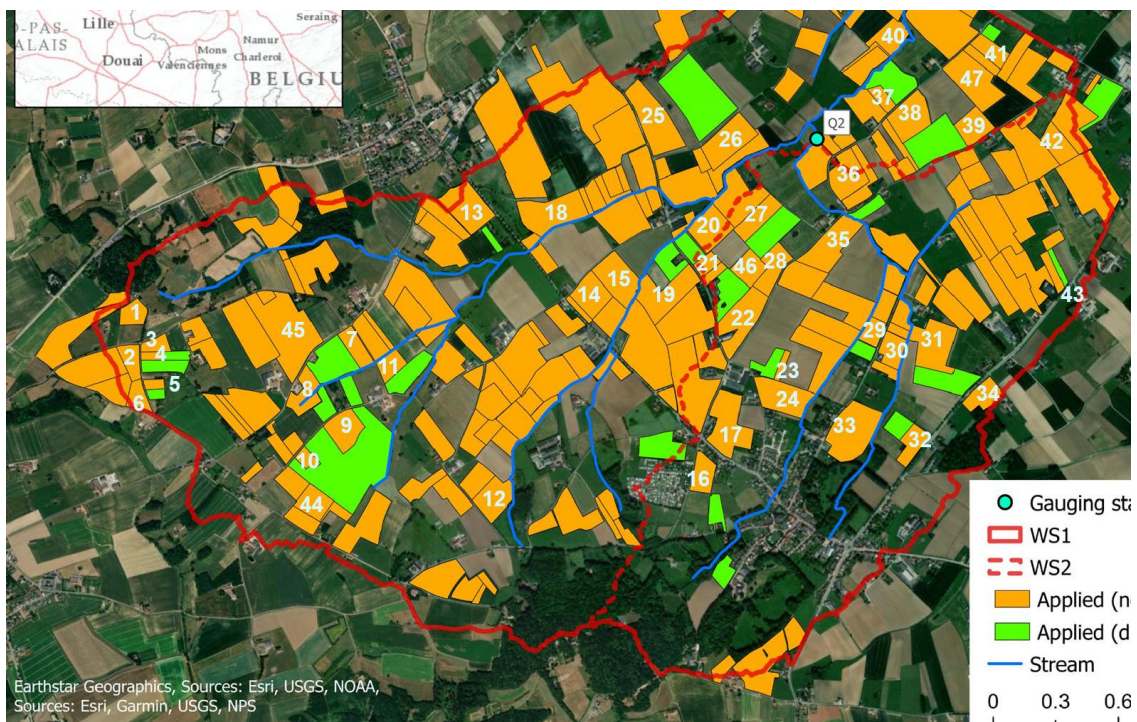
datum	neerslag	wolkenvrij beeld	datum	neerslag	wolkenvrij beeld
26/04/2018	0				
27/04/2018	0,1		10/04/2020	0	1
28/04/2018	0,1		11/04/2020	0	
29/04/2018	7,7		12/04/2020	0	
30/04/2018	28		13/04/2020	0	
01/05/2018	0,1		14/04/2020	0	
02/05/2018	0,3		15/04/2020	0	
03/05/2018	0		16/04/2020	0	
04/05/2018	0	1	17/04/2020	1.1	
05/05/2018	0		18/04/2020	22	
06/05/2018	0	1	19/04/2020	0	
07/05/2018	0		20/04/2020	0	1
08/05/2018	0		21/04/2020	0	
09/05/2018	0	1	22/04/2020	0	
			23/04/2020	0	1
01/09/2018	0	1			
02/09/2018	0		10/10/2023	0,1	1
03/09/2018	0		11/10/2023	0	
04/09/2018	0,9		12/10/2023	13	
05/09/2018	17,4		13/10/2023	13	
06/09/2018	0,1		14/10/2023	1,4	
07/09/2018	2,3		15/10/2023	0	1
08/09/2018	0	1	16/10/2023	0	
09/09/2018	0		17/10/2023	0	1
10/09/2018	0				
11/09/2018	0	1	11/06/2025	0	1
			12/06/2025	0	
19/03/2020	0		13/06/2025	2,6	1
20/03/2020	5,6		14/06/2025	7,5	
21/03/2020	0	1	15/06/2025	0	1
22/03/2020	0		16/06/2025	0	1
23/03/2020	0		17/06/2025	0	
24/03/2020	0	1	18/06/2025	0	1
25/03/2020	0		19/06/2025	0	
26/03/2020	0	1	20/06/2025	0,1	
			21/06/2025	0,3	1

Bodemvochtevolutie

In het gebied van de Grote Kimmelbeek werden er twee reeksen percelen geselecteerd: een reeks van 45 percelen met drainage (zie Figuur 23) en een reeks van 47 percelen zonder drainage (zie Figuur 24). Van elke reeks werden de 20 eerste percelen effectief gebruikt in de analyse (dus $2 \times 20 = 40$ percelen)



Figuur 23: Locaties van gedraineerde percelen in gebied Grote Kimmelbeek.

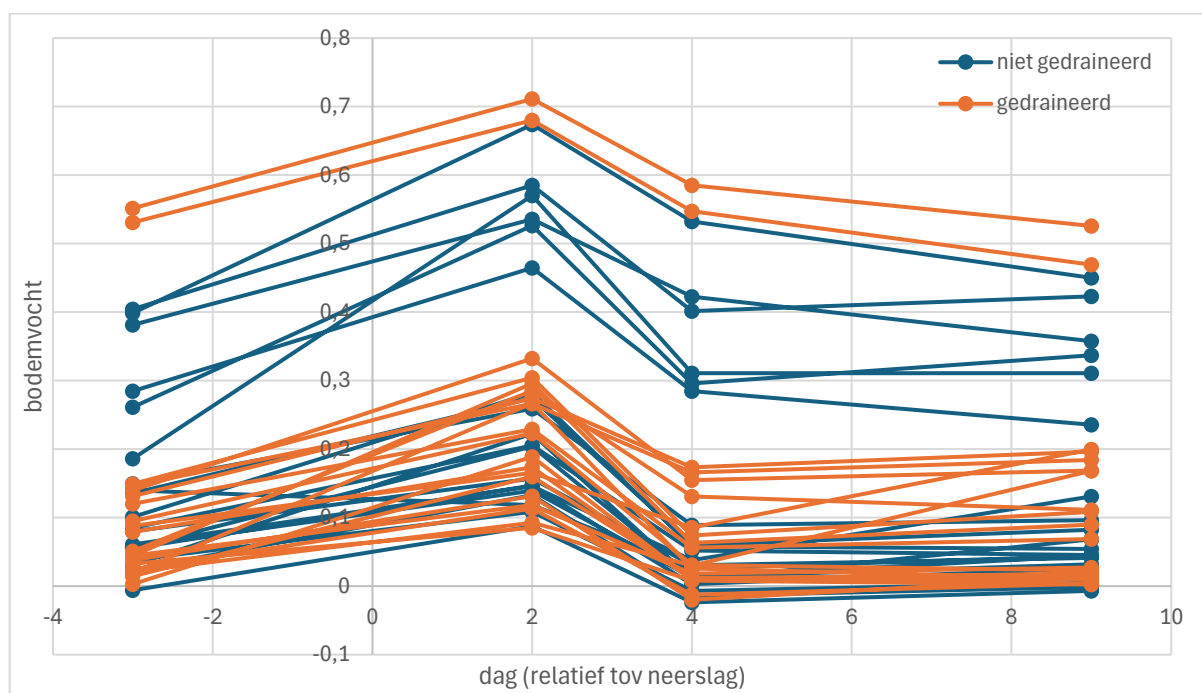
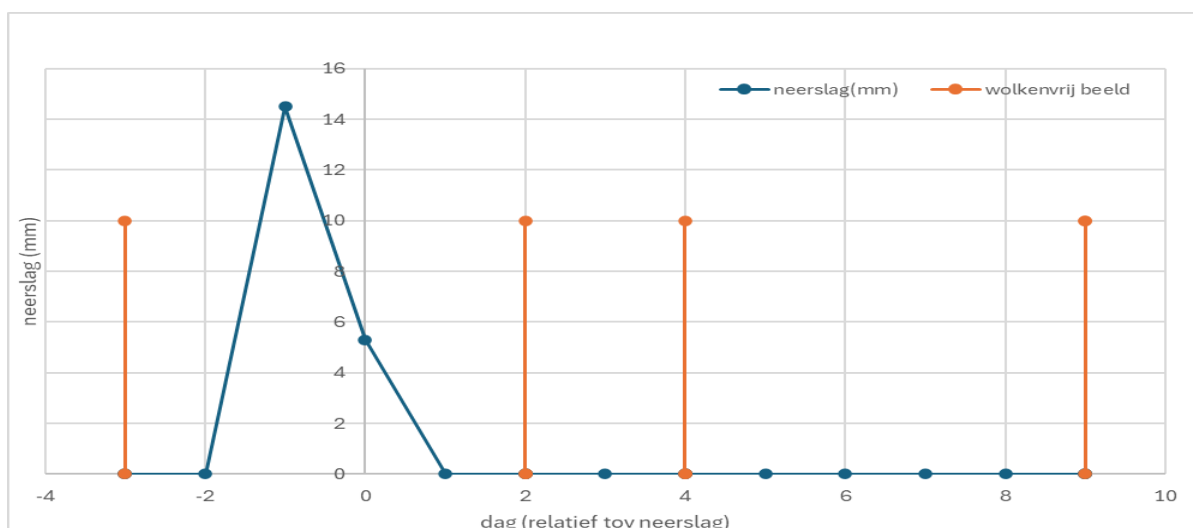


Figuur 24: Locaties van niet gedraineerde percelen in gebied van de Grote Kimmelbeek.

De parameters gebruikt in het model zijn:

- ## Visualisatie

pagina 59 van 94



De figuur toont een verwacht patroon voor het bodemvocht (in relatieve eenheid). Tussen datum -3 en +2 stijgt het bodemvocht voor vrijwel alle percelen, omwille van de neerslag. De afname nadien kunnen we bestuderen in het verschil tussen datum +2 en +4: deze gebeurt vrij snel met nogal wat variatie tussen de percelen. De afname op langere tijdsschaal (+4 tot +9) is kleiner, de meeste percelen blijven ongeveer gelijk, sommige worden droger, andere natter.

De gemiddelde variaties zijn opgelijst in Tabel 7. Tussen datum -3 en +2 is de toename in bodemvocht iets kleiner voor gedraineerde percelen, wellicht omdat de snelle afname vlak na de neerslag dit reeds gedeeltelijk compenseert. Tussen datum +2 en +4 is de afname bij gedraineerde percelen gemiddeld ook iets lager. Dit kan kloppen: door de drainage is wellicht bij deze percelen

Tabel 7: Bodemvocht toename (sequentie juni 2021).

Het verschil tussen dag 2 en 4 is het meest informatief. De bodemvochtvermindering is over het algemeen iets kleiner voor de gedraineerde percelen. Het verschil tussen de resultaten voor gedraineerde en niet gedraineerde percelen is echter klein en statistisch niet significant. De afname voor de individuele percelen leidt niet tot een goede discriminatie tussen (on)gedraineerde percelen.

Tabel 8: Bodemvocht sequentie juni 2021.

De combinatie van de bodemvochtwaarden zelf en diens variatie tussen twee tijdstippen kan mogelijk bijdragen tot een beter onderscheid tussen gedraineerde versus niet gedraineerde percelen. Ter exploratie plotten we de bodemvochtwaarde op dagen +2 t.o.v. de variatie tussen dag 2 en dag 4 in Figuur 30. De grafiek toont vooral voor de meeste percelen een lineair verband tussen het bodemvocht op dag 2, en de grootte van de reductie naar dag 4.

pagina 62 van 94

4.2.3 Discussie en interpretatie

De eerste twee problemen zijn een gevolg van de beperkte beschikbaarheid van wolkenvrije optische beelddata. Als alternatief is het echter ook mogelijk om bodemvochtschattingen te maken op basis van radarbeelden. Deze worden niet gehinderd door wolken en dus kunnen alle beschikbaar opnamen ook effectief gebruikt worden. Daarenboven is het zo dat de huidige radarbeelden van de Sentinel-1 satellieten, zoals aangeleverd binnen Copernicus een fijnere temporele resolutie hebben. Een overzicht van het aantal geschikte sequenties wordt in Tabel 10 gegeven. De operationele constellatie van 2 satellieten levert ongeveer 2 beelden per 3 dagen op. Gedurende de jaren 2022 tot 2024 was er slechts 1 van de 2 satellieten operationeel, vandaar dat het aantal beelden de helft lager lag.

Voor de analyse is er nog steeds de afhankelijkheid van het voorkomen van geschikte neerslagsequenties, maar volgens een ruwe schatting komen deze toch gemiddeld 6x per jaar voor, zodat er elk jaar voorbeelden zijn uit verschillende seizoenen. Minstens even belangrijk is echter dat tijdens een sequentie er minstens om de 2 dagen een nieuwe meting voorhanden zal zijn. Dit is essentieel om de snelle bodemvochtvariaties van vooral de gedraineerde percelen goed te capteren. De exacte criteria om te bepalen of een neerslagsequentie geschikt is, zouden mogelijk nog kunnen wijzigen nadat een succesvolle methode aantoont wat de beste keuze is voor deze criteria.

Het effectief gebruik van radarbeelden veronderstelt dat een nauwkeurige bodemvochtschatting op perceelniveau beschikbaar is. Dit is momenteel niet het geval, er zijn alleen bodemproducten aan een lagere spatiale resolutie beschikbaar. Wel zijn er geschikte methodieken voorhanden (voor een recent overzicht verwijzen we naar Rahmati et al., (2026), welke het waarschijnlijk maken dat een succesvolle implementatie van een bodemvochtproduct op perceelsniveau mogelijk is aan de hand van radar-data.

Tabel 10: Aantal geschikte sequenties met gebruik van radarbeelden.

	Sentinel-1	sequenties
2017	240	10
2018	234	8
2019	238	6
2020	243	6
2021	237	7
2022	120	3
2023	122	6
2024	120	4
2025	178	6
gemiddeld	240 (120)	6

4.3 VHR-DETECTIE VAN ONDERGRONDSE DRAINAGE

4.3.1 Methodologie

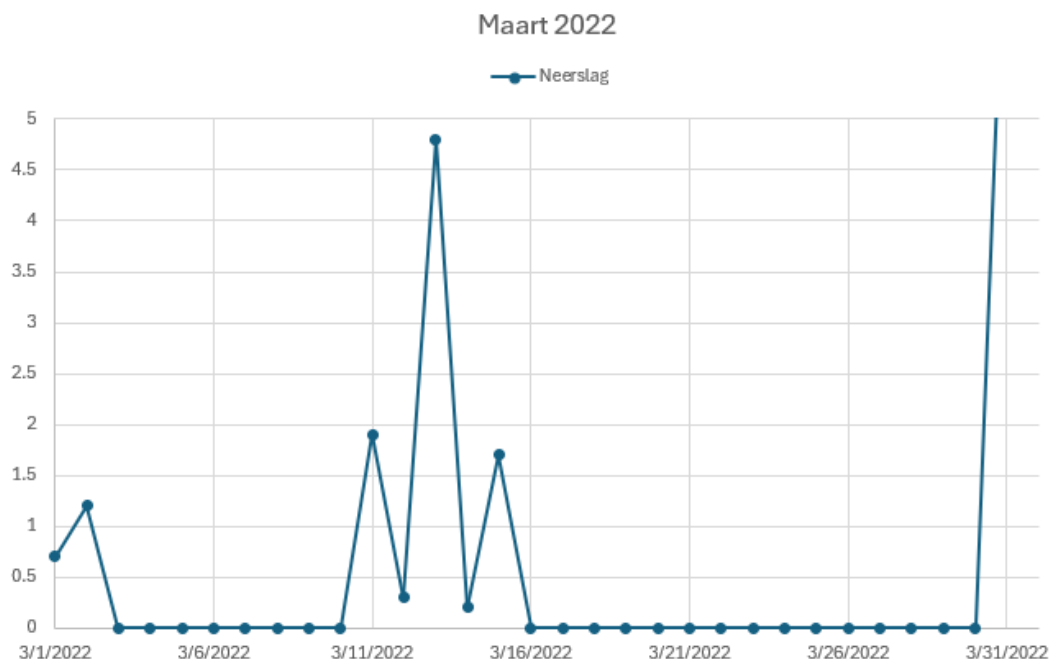
Zoals beschreven in paragraaf 2.2.2 - Patroondetectie op VHR-beelden - vormt het vinden van geschikte Very High Resolution (VHR) satellietbeelden een belangrijke uitdaging bij het detecteren van ondergrondse drainage. Uit de literatuur blijkt dat zulke detecties alleen mogelijk zijn onder zeer specifieke omstandigheden: tijdens het niet-groeiseizoen, tussen 4 en 10 dagen na een significante regenval van meer dan 25 mm op korte tijd, en pas na minstens drie opeenvolgende droge dagen. Dergelijke omstandigheden komen (in Vlaanderen) zelden voor binnen één jaar. Bovendien is het, zelfs wanneer een geschikte datum wordt geïdentificeerd, niet gegarandeerd dat er voor die datum ook VHR-archiefbeelden beschikbaar zijn.

De gebruikte methodologie om na te gaan of VHR-beelden een nuttige databron zijn om ondergrondse drainage te karteren, is weergegeven op Figuur 31. De eerste stap in het zoeken naar bruikbare beelden bestaat erin patronen te identificeren op Google Earth op locaties waar grondwaarheid bevestigt dat drainage aanwezig is én waarvan de opnamedata voldoen aan de hierboven beschreven voorwaarden. We kiezen voor Google Earth aangezien deze data vrij beschikbaar zijn en voldoende zijn om een eerste inzicht te geven zonder dat moet overgegaan worden tot de aankoop van satellietdata. Google Earth biedt historische beelden waardoor meerdere opnamedata beschikbaar zijn. Dit verhoogt de kans om drainagepatronen te herkennen of bevestiging te krijgen van een patroon dat in een specifieke opname zichtbaar is.

Wanneer de Google Earth-benadering onvoldoende informatie oplevert, bestaat een alternatief erin om rechtstreeks in de archieven van beeldleveranciers te zoeken naar opnames met een hoge kans op zichtbare drainagepatronen. De archieven van de verschillende satellietbeeldleveranciers zijn immers meer uitgebreid dan de data welke opgenomen zijn in Google Earth.

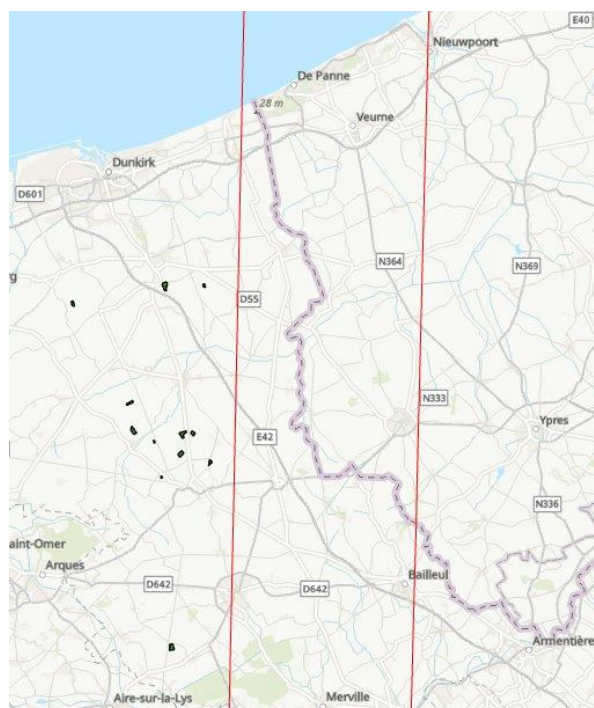
Wanneer vervolgens beelden met duidelijke drainagepatronen worden gevonden, kan het door Breitkopf (Breitkopf et al., 2022) ontwikkelde en getrainde machine-learningmodel (ML) worden toegepast. Op basis daarvan kan worden beoordeeld of het model geschikt is om drainagepatronen in heel Vlaanderen te detecteren, of dat bijkomende training nodig is om het model beter af te stemmen op de Vlaamse context.

De Google Earth satellietopname waarop de patronen zichtbaar waren, dateert van **19 maart 2022**. Analyse van meteorologische gegevens toont aan dat deze datum voldoet aan de voorwaarden voor het detecteren van drainagepatronen (Figuur 34). Helaas beslaat deze specifieke opname op Google Earth geen deel van Vlaanderen, waardoor een beeld met identieke opnamekenmerken en -datum voor Vlaanderen niet beschikbaar is. Dit kan verklaren waarom er in Vlaanderen geen patronen konden worden vastgesteld. De beschikbare beelden voor naastliggende Vlaamse percelen hebben immers andere opnamedata en beeldkenmerken, waardoor drainagepatronen - indien aanwezig - mogelijk niet zichtbaar waren.



Figuur 34: dagelijkse gemiddelde neerslag bij het Ieper station.

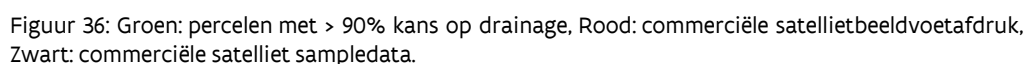
Hoewel het beeld van 19 maart 2022 niet beschikbaar is via Google Earth voor Vlaanderen, bestaat er wel een archiefbeeld met dezelfde datum bij een commerciële beeldleverancier (alternatieve aanpak voor het vinden van het juiste beeld zoals beschreven in de methodologie). De beeldvoetafdruk (footprint) van dit commercieel archief satellietbeeld dekt een beperkt deel van West-Vlaanderen en wordt in het rood weergegeven in Figuur 35.



Figuur 35: Voetafdruk commercieel satellietbeeld beeldleverancier in rood.

Het gebied binnen deze footprint bedraagt 375 km². Dankzij de goede samenwerking tussen GIM en de beeldleverancier konden voor dit project sampledata worden verkregen. Het bestellen van

Voor het afbakenen van de samplegebieden kon de grondwaarheidsdata uit de Grote Kemmelbeek niet worden gebruikt, aangezien deze buiten de footprint valt. Ook de gegevens van het milieuloket konden niet worden gebruikt, omdat de drainagesystemen van de percelen in het voetafdrukgebied na de datum van verwerving van de afbeelding zijn aangelegd. Daarom werd gebruikgemaakt van de resultaten van de GIS-analyse, die de kans op drainage per perceel inschat op basis van meerdere criteria. Percelen met een geschatte kans van meer dan 90% werden geselecteerd. Drie clusters met een hoge concentratie van dergelijke percelen werden aangeduid om samplebeelden op te vragen (Figuur 36).



pagina 70 van 94

4.3.3 Discussie en interpretatie

Hoewel het niet evident is om een opnamedatum te vinden die aan alle vereisten voldoet, konden we in dit project toch één geschikte datum identificeren: 19 maart 2022. Op deze datum werd in een commercieel satellietbeeld voor Noord-Frankrijk een vermoedelijk drainagepatroon opgemerkt, maar in Vlaanderen werden geen drainagepatronen gedetecteerd. Voor dit verschil tussen Noord-Frankrijk en Vlaanderen kunnen drie mogelijke verklaringen worden aangehaald:

- **Afwezigheid van effectieve drainage** in de drie geselecteerde Vlaamse samplegebieden, ondanks wat op basis van de GIS-analyse zou kunnen worden verwacht.
- **Veronderstelde verschillen in installatie en technische specificaties van drainage** tussen Frankrijk en Vlaanderen, zoals:
 - Het ontwerp van het drainagesysteem (bijvoorbeeld verschillen in afstand tussen de drainbuizen).
 - De diepteligging van de drainagebuizen (hoe dieper de buizen, hoe moeilijker ze te detecteren zijn).
- **Intensiever beheer van de landbouwpercelen**, waardoor percelen vaker geploegd en begroeid zijn, wat het identificeren van drainagepatronen bemoeilijkt.

Op basis van de beschikbare informatie moeten we voorlopig concluderen dat het niet mogelijk is om drainagebuizen te detecteren op zeer hoge resolutie (VHR) satellietbeelden. Om de haalbaarheid accurater te kunnen evalueren, zijn extra gegevens noodzakelijk:

- Gekende locaties van gedraineerde percelen binnen de footprint van de commerciële beelden (geen enkel van de gekende locaties viel binnen de beschikbare beeldgegevens, of niet op de gewenste data voor de analyse zoals voor de gegevens van Omgevingsloket).
- Specifieke technische informatie over drainage in België en Frankrijk (ontwerp, diepte, installatiemethoden enz.).

Met deze bijkomende informatie kan beter worden gevalideerd of de patronen in het beeld van 19 maart 2022 daadwerkelijk overeenkomen met drainage, en/of VHR satellietbeelden in staat zijn om dergelijke patronen betrouwbaar te detecteren binnen Vlaanderen.

Tot slot, bij vergelijking van drainagepatronen uit de literatuur (VS) met die van Noord-Frankrijk en Vlaanderen, vallen volgende verschillen op:

- De onderlinge afstand tussen drainagebuizen is kleiner in Noord-Frankrijk, wat resulteert in een dichter patroon.
- De buizen binnen één perceel hebben doorgaans allemaal dezelfde oriëntatie.

Het ML-model van Breitkopf et al. (2022) werd getraind op een dataset uit de Verenigde Staten. Aangezien de patronen daar duidelijk verschillen van die in (de omgeving van) Vlaanderen, lijkt het model momenteel onvoldoende geschikt om drainagepatronen in Vlaanderen te detecteren. Aanvullende training met beelden uit Vlaanderen zou nodig zijn om het model te optimaliseren voor toepassingen in deze context.

5 ROADMAP

5.1 CONCRETE AANBEVELING VOOR VERVOLGTRAJECT

In deze studie (voortraject) werd onderzocht welke methodieken beschikbaar zijn om ondergrondse drainage op grote schaal in kaart te brengen. Enkele van deze methodieken werden vervolgens getest op (delen van) Vlaanderen. Daarbij werd zowel gewerkt met GIS-analyses, gebaseerd op fysische inputdata, als met remote-sensing methodieken die veranderingen in bodemvocht of drainage-patronen proberen te detecteren. Het uiteindelijke streefdoel, het ontwikkelen van een gebiedsdekkende kaartlaag die expliciet aangeeft waar ondiepe drainage voorkomt, viel buiten de scope van dit voortraject. De bedoeling was vooral om te bepalen wat vandaag technisch haalbaar is, welke methodieken potentieel bieden en waar technische belemmeringen of onzekerheden blijven bestaan. Uit deze verkenning blijkt dat het einddoel, namelijk het samenstellen van een volledig geografisch expliciete drainagekaart, niet eenvoudig te realiseren is met de huidige databeschikbaarheden en geteste methodieken.

De GIS-analyses tonen wel aan dat het mogelijk is om ruimtelijke patronen van drainageverwachting af te leiden uit fysische variabelen zoals grondwaterdiepte, topografie en bodemkenmerken. Dergelijke kaarten geven een realistisch beeld van waar drainage in Vlaanderen waarschijnlijk optreedt vanuit een wensbeeld, maar leveren geen harde “ja/nee”-classificatie op, op perceelsniveau. Wel kunnen ze een waardevolle bijdrage leveren bij het afbakenen van zoekzones op het terrein.

Parallel werd onderzocht of remote sensing die binaire onderscheiding wel kan maken. De resultaten tonen dat dit met de geteste methodieken niet het geval is: satellietsignalen blijken onvoldoende onderscheiden vermogen te hebben om drainagesignalen rechtstreeks te detecteren. Dit komt door de grote ruimtelijke variabiliteit in Vlaanderen, zowel in bodemtypes, topografie, landgebruik en grondwaterstanden. Proxies afgeleid uit remote sensing data, zoals bodemvochtschattingen, worden beïnvloed door verschillende omstandigheden (helling van het perceel, irrigatie, oppervlakkige waterafvoer, bodemeigenschappen). Hierdoor is het moeilijk om geobserveerde patronen toe te schrijven aan één specifieke omstandigheid, zoals drainage. Daarnaast vormt het aantal beschikbare en bruikbare beelden een beperking om temporele variaties in bodemvocht nauwkeurig op te volgen. Daarbovenop komt dat landbouwpercelen in Vlaanderen intensief worden bewerkt, waardoor patronen van drainagebeelden op VHR-beelden vaak verstoord of volledig onzichtbaar zijn. Dit staat in contrast met regio's in de Verenigde Staten of Noord-Frankrijk, waar dergelijke patronen veel eenvoudiger interpreteerbaar blijken.

De detecteerbaarheid wordt verder bemoeilijkt door het ontbreken van basisinformatie over de diepte, ouderdom en werking van drainagesystemen, wat een cruciale parameter is voor het interpreteren van remote sensing-signalen.

Deze bevindingen sluiten nauw aan bij gelijkaardige studies. In een grootschalige studie van Møller et al. (2018) in Denemarken bleek dat, binnen Machine Learning-modellen, GIS- en bodemvariabelen (zoals kleifractie) veel meer verklaringskracht hadden dan inputlagen afgeleid van remote-sensing data. Een belangrijke kanttekening hierbij is dat de gebruikte inputlagen op basis van remote sensing geen temporele informatie bevatten en enkel beelden van maart 2014 werden gebruikt (reflectance in verschillende banden, samen met afgeleide proxies). De studie concludeert dat de

Cho et al. (2019) daarentegen rapporteerden wel dat remote-sensing data meerwaarde bieden voor kartering van ondergrondse drainage, maar hun resultaten moeten in de juiste context worden geplaatst. Hun studiegebied in de Verenigde Staten bestond uit veel grotere, homogene landbouwpercelen dan in Vlaanderen, met minder bodemverstoring en minder variatie in teeltrotaties. In dergelijke landschappen zijn ruimtelijke en seizoensgebonden patronen in vegetatie of bodemvocht veel consistenter, waardoor drainage-effecten in het satelliet signaal beter zichtbaar worden. In tegenstelling tot Møller et al (2018) maakten Cho et al. (2019) wel gebruik van seizoenale dynamieken in remote sensing indices door gebruik te maken van zowel lente als zomer vegetatie-indices, wat een interessante oefening kan zijn in Vlaamse context.

Een meer realistische, wetenschappelijk onderbouwde weg bestaat erin om een gefaseerde aanpak te hanteren, waarbij

- Een voorstel van operationeel vervolgtraject om de gefaseerde aanpak te verbeteren, kan daarom worden opgezet in verschillende stappen.

Als eerste stap wordt een kleiner, maar representatief testgebied geselecteerd. Een afstroomgebied kan bijvoorbeeld een geschikt gebied zijn.

In het testgebied kunnen remote sensing data (multispectrale banden, afgeleide vegetatie-indicess inclusief seizoensdynamiek, radarbeelden) gecombineerd worden met bestaande GIS-lagen (bodem, topografie, grondwater, landgebruik, beheersmaatregelen) Het doel is na te gaan in welke mate deze gecombineerde 'feature space' de nauwkeurigheid van drainagedetectie kan verhogen ten opzichte van de huidige aanpak.

In een derde stap wordt een prototype dashboard ontwikkeld dat de belangrijkste inputlagen (remote sensing indicatoren, fysische en bodemkundige kenmerken, grondwaterinformatie) samenbrengt, samen met een kaart van de geschatte kans op aanwezigheid van drainagesystemen. Een dergelijke waarschijnlijkheidskaart kan gebruikt

worden als operationele ondersteuning voor verschillende beleidskaders. Op die manier kan de combinatie van indirecte informatie (fysische kenmerken, hydrologie) en dynamische remote sensing signalen leiden tot een meer gerichte en efficiënte inzet van de betrokken methodiek.

4. Opschaling naar Vlaanderen

Als de aanpak in het testgebied robuust blijkt, kan in een laatste stap worden onderzocht in welke mate de methode opgeschaald kan worden naar Vlaanderen. Daarbij moet expliciet worden benadrukt dat een binaire drainagekaart op basis van louter indirecte informatie weinig realistisch is.

Een volledig correcte aanwezigheid/afwezigheid-kaart van drainagesystemen kan in de praktijk enkel worden opgebouwd op basis van een grotere set aan administratieve of geïnventariseerde informatie (vergunningen, plannen, terreinopmetingen). De voorgestelde aanpak levert in de eerste plaats een probabilistische kaart op, niet als sluitend juridisch instrument.

De resultaten van dergelijk traject kunnen nauw aansluiten bij verschillende beleidskaders die vandaag al lopen in Vlaanderen. In uiteenlopende domeinen, van natuurherstel en waterkwaliteit tot vergunningenbeleid, klimaatrapportering en droogteaanpak, groeit de nood aan beter inzicht in het wensbeeld m.b.t. ondergrondse drainage. In de volgende sectie wordt toegelicht hoe de ontwikkelde inzichten en methodieken kunnen worden ingezet binnen deze beleidskaders en welke specifieke accenten per domein relevant zijn.

5.2 RELEVANTE BELEIDSKADERS

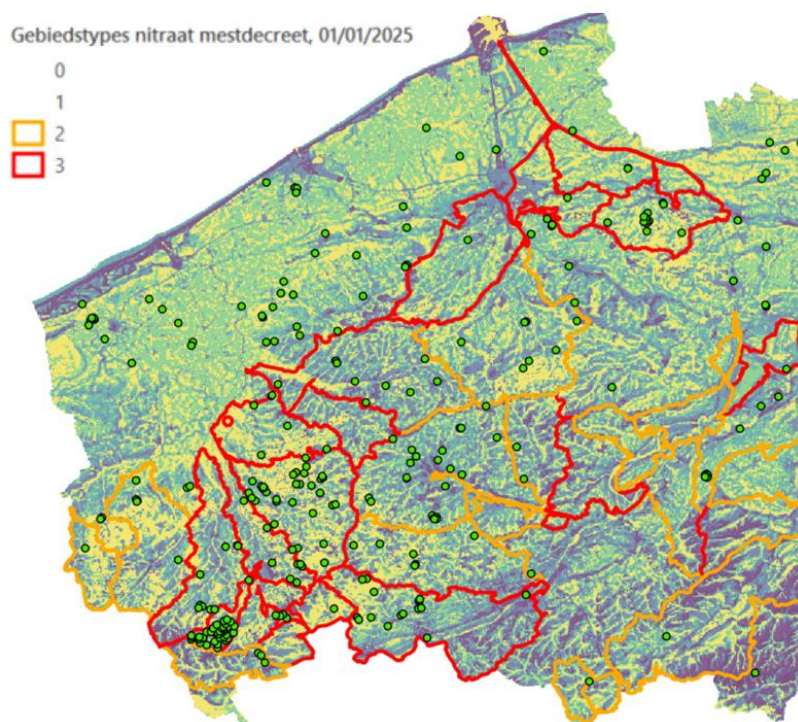
Deze voorstudie toont aan dat het vandaag de dag nog niet mogelijk is om een accurate, gebiedsdekkende drainagekaart voor Vlaanderen op te stellen. Echter, meer inzichten in de ruimtelijke spreiding van ondergrondse drainage kan een hefboom vormen voor diverse beleidsdoelen en regelgevingstrajecten, zoals geïllustreerd in Figuur 43. De uiteenlopende doelen, van veenherstel en waterkwaliteit tot vergunningenbeleid en klimaatadaptatie, bieden een kader om gericht te verkennen welke methodieken haalbaar zijn voor welke toepassing, en welk niveau van nauwkeurigheid daarvoor minimaal vereist is.

In wat volgt gaan we iets dieper in op de verschillende beleidskaders waar inzicht in ondergrondse drainage wenselijk is en kijken welke stappen genomen kunnen worden per domein.

Mestactieprogramma: Verbetering van de waterkwaliteit

Het MAP-meetnet omvat ongeveer 750 meetplaatsen waar maandelijks oppervlaktewaterstalen worden genomen en geanalyseerd op nitraat en orthofosfaat. Daarnaast worden in circa 1.700 grondwatermeetputten tweemaal per jaar monsters genomen die op dezelfde parameters worden onderzocht. Op basis van de gemeten nitraatconcentraties worden afstroomgebieden ingedeeld in types van 0 (goede waterkwaliteit) tot 3 (ontoereikende kwaliteit) (enkel voor nitraten, niet voor fosfaten). Ter illustratie toont Figuur 45 een overlay van de drainage-vermoedenskaart met gebiedstypes 2 en 3 in West-Vlaanderen. In zones waar veel drainagesystemen zijn gemeld (uit omgevingsaanvragen en meldingen, groene punten), vallen meerdere stroomgebieden op die slechter scoren.

In dit beleidskader is het zinvol om dit mogelijke verband verder te analyseren. Een volledig gedetailleerde binaire drainagekaart is daarbij niet strikt noodzakelijk: een verfijnde GIS-analyse kan al waardevolle inzichten bieden in de relatie tussen drainage-dichtheid en waterkwaliteit.



Figuur 45: Overlay tussen de drainage-vermoedenskaart (groene punten zijn plaatsen waar veel drainagesystemen verwacht worden) op basis van scenario 4 en gebiedstypen 2 en 3 in het mestdecreet.

Blue deal; vasthouden van water

De Blue Deal is een beleidsvisie die Vlaanderen weerbaarder moet maken tegen droogte, overstromingen en de toenemende druk op de waterkwaliteit. Een geïntegreerde aanpak en samenwerking op alle niveaus staan daarbij centraal. In deze context wordt ondergrondse drainage expliciet genoemd als een belangrijke uitdaging: het beperken van drainageverliezen, het opsporen van illegale systemen en het verbeteren van de inventaris in hydrologisch kwetsbare gebieden zijn belangrijke maatregelen om water langer vast te houden en ecosystemen te beschermen.

Uit deze voorstudie blijkt dat het vandaag technisch en methodologisch niet haalbaar is om op Vlaamse schaal een volledig betrouwbare binaire drainagekaart op te stellen op basis van remote sensing. Daarom stellen we voor om te werken met goed gekozen pilootgebieden waarin de meest veelbelovende methodieken uit dit onderzoek verder kunnen worden getest en verfijnd. Resultaten van zo'n gebiedsgerichte, meer lokale aanpak kunnen nuttig zijn voor lokale gebiedscoalities binnen de Blue Deal. In zo een gebiedscoalitie werken lokale en bovenlokale partners samen rond onder meer waterconservering, verdroging en hydrologisch herstel. De lokale gebiedscoalities werken aan een zogenaamde lokale blue deal om zgn. "sponsdoelen" (infiltratie, de-drainage en buffering), geïntegreerd met andere doelen, te realiseren. Via lokale blue deals werken lokale gebiedscoalities op schaal van een (deel)stroomgebied vervolgens aan de uitvoering van een actieplan. Zeker in regio's waar de kans op drainage hoog is, is het wenselijk om drainage-opsporing, inventarisatie en methodiekontwikkeling worden te integreren in het actieplan.

Potentieel voor peilgestuurde drainage

Klassieke drainage voert water automatisch af, ook op momenten dat het vasthouden van water wenselijk is. Peilgestuurde drainage vormt daarom een waardevol alternatief, doordat het toelaat het drainagepeil tijdelijk te verhogen en water langer in het systeem te houden. Dit kan leiden tot een betere waterbeschikbaarheid voor het gewas, een verhoogde droogteresistentie en, in bepaalde omstandigheden, ook tot een efficiëntere nutriëntenopname door planten. In dat licht is de ruimtelijke ligging en concentratie van (potentieel) gedraineerde percelen op gebiedsniveau cruciaal om te kunnen inschatten waar peilgestuurde drainage technisch en hydrologisch haalbaar is. Binnen het OP Peil-project werd reeds een potentiekaart voor peilgestuurde drainage in Vlaanderen opgesteld (Figuur 46a), die een eerste ruimtelijk kader biedt voor gerichte toepassing. Ook in recente praktijkstudies (Rigo, 2025) tonen aan dat peilgestuurde drainage geen universele oplossing is, zeker in Poldergebieden: de effectiviteit ervan is sterk contextafhankelijk en verschilt per perceel, onder meer in functie van bodemopbouw, hydrologische setting en gebruiksdoel. Hierdoor zijn er dus wellicht raakvlakken met een mogelijk vervolgverhaal van de studie rond mogelijke kartering van drainagesystemen.

Naast lopend en recent onderzoek is er ook vanuit het beleid toenemende aandacht voor de omvorming van klassieke naar peilgestuurde drainage. In het Vlaams Klimaatadaptatieplan werd binnen het thema klimaatslimme landbouw expliciet verwezen naar de aanpassing naar peilgestuurde drainage of afbouw van klassieke drainage naar voren geschoven als een belangrijke maatregel om schade door wateroverlast en aanhoudende droogte te beperken, en tegelijk de watervoorraad voor de landbouw te vrijwaren.

Deze beleidsambitie is intussen ook vertaald naar regelgeving. Vanaf 1 juli 2025 mag drainage in bepaalde delen van Vlaanderen uitsluitend nog peilgestuurd worden aangelegd of heraangelegd voor draineringen die onder VLAREM-rubriek 53.3 vallen, als onderdeel van de zogenaamde Grondwatertrein. De gebieden waar deze omvorming verplicht is, zijn weergegeven in Figuur 50b en vallen grotendeels samen met zones die op de potentiekaart als kansrijk tot zeer kansrijk voor peilgestuurde drainage werden aangeduid. Dit benadrukt het belang van verdere verfijning van drainagekartering, waarbij onderzoek kan bijdragen door beter in kaart te brengen waar drainage voorkomt en waar omvorming naar peilgestuurde systemen het meest relevant is vanuit hydrologisch en beleidsmatig perspectief.

Prioritering van focusgebieden

Om richting te geven aan een mogelijk vervolgtraject werd nagegaan in welke gebieden de noodzaak én de relevantie voor verdere kartering van ondergrondse drainage het grootst zijn (Figuur 47). Hiervoor werden vier bestaande kaartlagen geselecteerd die rechtstreeks verband houden met lopende of geplande beleidsinitiatieven:

- a) de veenwaarschijnlijkhedsk kaart,
- b) de gebiedstypen 3 en 4 van het MAP,
- c) de verplichtingskaart voor peilgestuurde drainage en
- d) gebieden die uit de GIS-analyse naar voorkomen met veel potentieel voor drainage

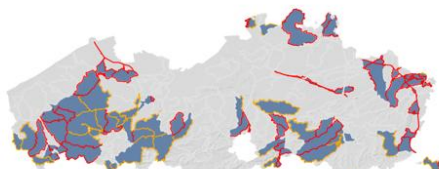
Elke kaart werd herschaald naar een binaire classificatie (0 = niet van toepassing, 1 = relevant voor drainagebeleid). Door deze binaire kaarten pixel per pixel op te tellen, ontstond een samengestelde indicatiekaart met waarden van 0 tot 4. Een hogere waarde betekent dat meerdere beleidskaders of regelgeving op die locatie mogelijk van toepassing zijn.

Het resultaat (Figuur 47e) geeft daarmee een overzicht van de gebieden waar verdere kartering vanuit beleidsmatig perspectief het meest relevant is. Deze zones vormen logische kandidaten voor pilootgebieden in een vervolgtraject, omdat daar de meerwaarde van verdere kartering en methodiekontwikkeling het grootst is én meerdere beleidskaders tegelijk ondersteund kunnen worden (Blue Deal, MAP, klimaatslimme landbouw en peilgestuurde drainage, LULUCF-verordening of Natuurherstelwet). Zo gebeuren acties niet versnipperd, maar in functie van de meest urgente beleidsuitdagingen.

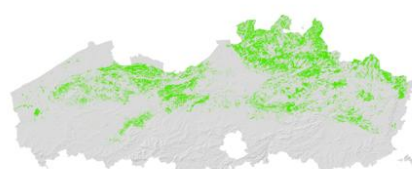
a) Veenwaarschijnlijkheidskaart (herschaald naar 0/1 categorie)



b) Gebiedstypes 2 en 3 MAP



c) Kansrijke gebieden peilgestuurde drainage

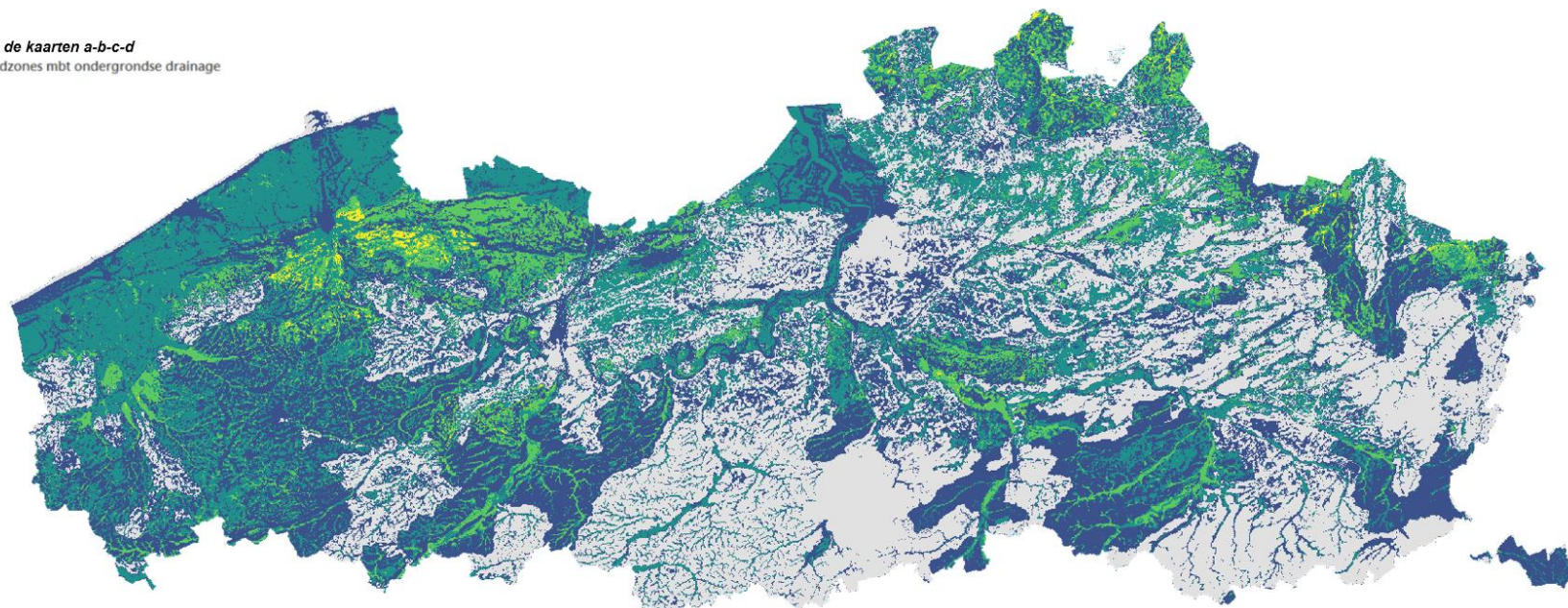
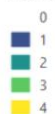


d) Vermoeden drainage (scenario 4) > 80%



e) Optelkaart van de kaarten a-b-c-d

Relevante beleidzones mbt ondergrondse drainage



Figuur 47: Overzicht van vier beleidsrelevante kaartlagen (a–d) gerelateerd aan ondergrondse drainage en de samengestelde optelkaart (e), die aangeeft waar meerdere beleidskaders tegelijk van toepassing zijn.

6 CONCLUSIES

Deze voorstudie onderzocht welke methodieken vandaag beschikbaar zijn om ondiepe ondergrondse kunstmatige drainage in Vlaanderen in kaart te brengen. Op basis van de literatuur werden drie hoofdmethodieken onderscheiden, die elk op een verschillend schaalniveau werken. In deze studie zijn deze methodieken, waar mogelijk, toegepast of getest zodat hun bruikbaarheid in de Vlaamse context kon worden beoordeeld.

Een noodzakelijke eerste stap was het samenstellen van een inventaris van gekende gedraineerde percelen. Deze inventaris fungeert als referentiedataset voor de evaluatie van de testmethodieken. De inventaris werd opgebouwd uit drie bronnen:

- 1) administratieve gegevens uit het Omgevingsloket, waar contouren van nieuwe of gewijzigde drainage sinds 2018 verplicht worden opgeladen. Deze dataset vormt de kern van de inventaris en omvat 472 projecten verdeeld over 568 percelen;
- 2) ruimtelijke informatie uit wetenschappelijke studies en grijze literatuur; en
- 3) aanvullende informatie van instanties die reageerden op een gerichte bevraging van landbouw- en gebiedsorganisaties.

De inventaris toont dat drainage vooral voorkomt in gebieden met ondiepe grondwatertafels, beperkte natuurlijke afwatering en intensief landbouwgebruik, al blijft de ruimtelijke variatie in Vlaanderen groot.

1. GIS-gebaseerde methodieken

GIS-analyses op basis van bodemeigenschappen, grondwaterdiepte, topografie en landgebruik bleken een robuuste manier om zones met een verhoogd potentieel om drainage te realiseren te identificeren. De opgestelde drainage-vermoedenskaarten leveren een realistisch, ruimtelijk consistent beeld op. Ze bieden echter geen betrouwbare binaire classificatie op perceelsniveau. De resultaten blijven indicatief en de focus ligt vooral op het in kaart brengen van gebieden met potentieel voor drainage. De studie toont bovendien aan dat de aannames over niet-gedraineerde referentielocaties een grote invloed hebben op de modeluitkomsten.

2. Publieke remote-sensingdata

In tegenstelling tot GIS-methodieken leert de literatuur dat remote sensing methodieken een onderscheid kunnen maken tussen gedraineerde en niet-gedraineerde gebieden. In kader van deze voorstudie werd getest in welke mate bodemvochtschattingen op basis van publieke remote sensing data ondergrondse drainage in Vlaanderen kan detecteren. In deze studie werd het potentieel van bodemvochtproxies (OPTRAM) getest in het stroomgebied van de Grote Kemmelbeek. Er zijn aanwijzingen dat bodemvocht in gedraineerde percelen zich anders gedraagt na regenbuien dan in niet-gedraineerde percelen. Met de huidige dataset zijn de verschillen echter niet sterk genoeg om een effectief onderscheid te maken. Oorzaken hiervan zijn: de beperkte data (slechts enkele geschikte perioden in de tijd), en de temporele resolutie die niet fijn genoeg is om de verschillen dag per dag te capteren. Beide problemen kunnen mogelijks opgelost worden door over te schakelen op bodemvochtschattingen op basis van radarbeelden (ongevoelig voor wolken, Sentinel-1 levert 2 beelden elke 3 dagen), op voorwaarde dat goede bodemvochtproducten kunnen afgeleid worden op perceelsniveau.

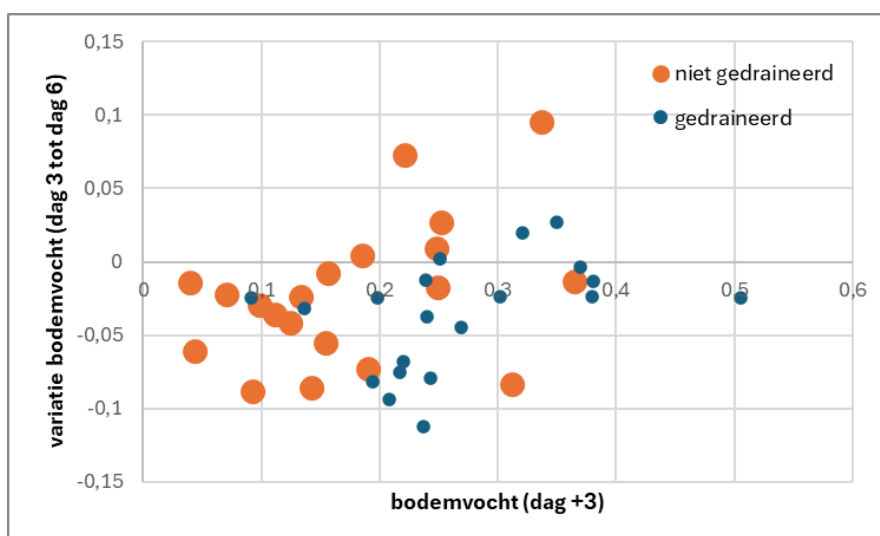
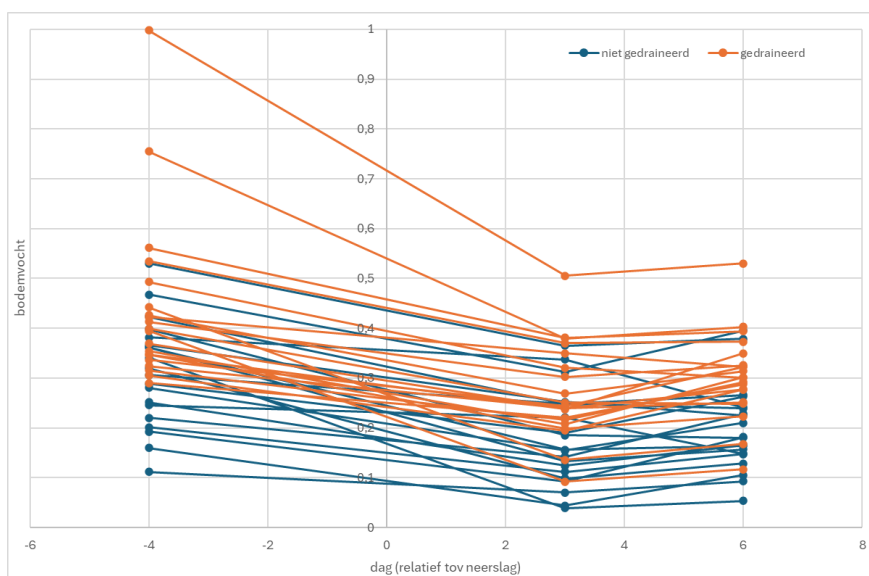
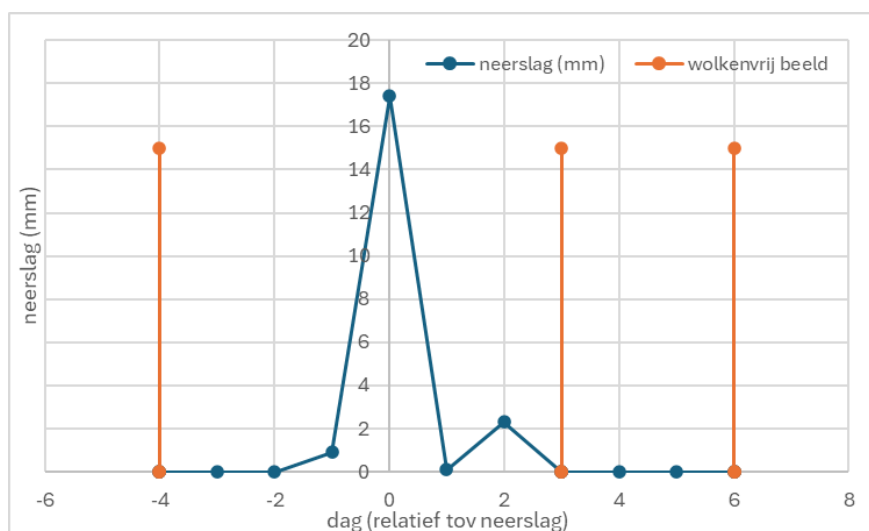
3. Very High Resolution satellietbeelden

VHR-beelden kunnen onder ideale omstandigheden drainagebuizen zichtbaar maken, zoals in bepaalde regio's in de Verenigde Staten en Noord-Frankrijk. In deze voorstudie werden dergelijke omstandigheden in West-Vlaanderen echter niet teruggevonden. De enkele patronen die werden gevonden, bleken vooral gelinkt aan ruilverkavelingen. Intensieve landbouwbewerkingen, heterogene bodemstructuren en mogelijk ook verschillen in de installatie van ondergrondse drainagesystemen maakten dat VHR-beelden geen bruikbare drainagepatronen opleverden. De inzetbaarheid op grotere schaal wordt bovendien beperkt door hoge kosten, beperkte beelddekking en afhankelijkheid van specifieke opnamecondities.

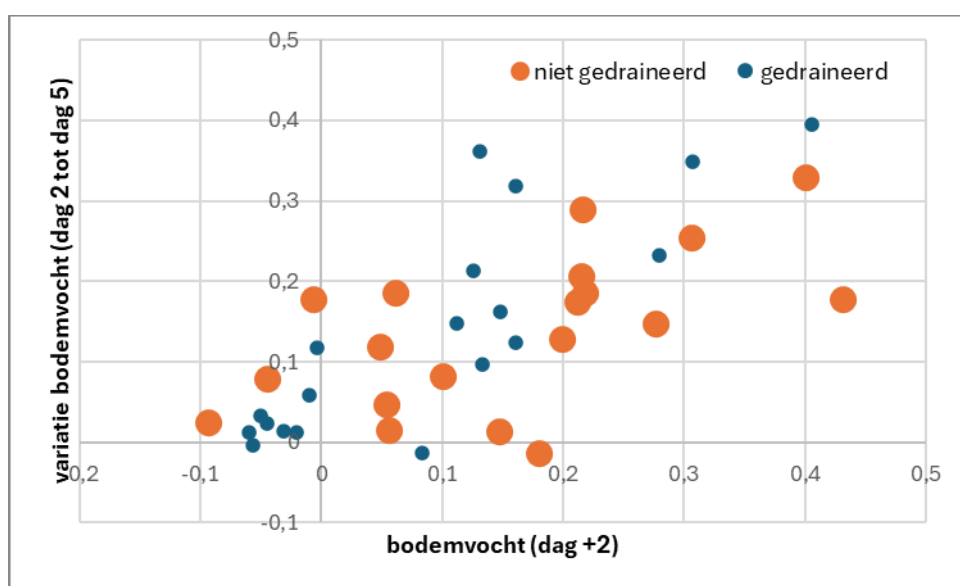
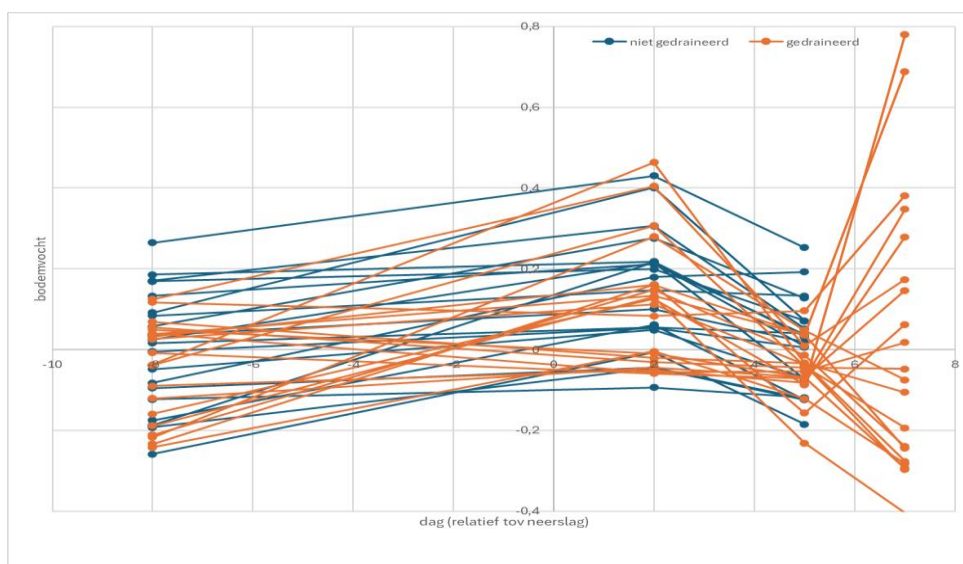
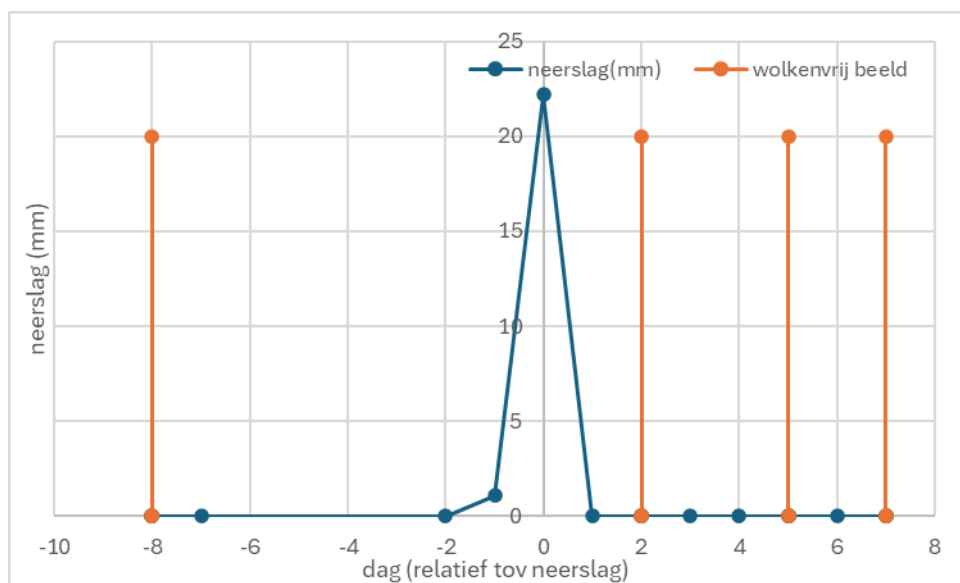
Samengevat tonen de resultaten dat momenteel geen enkele methode in staat is om ondergrondse drainage eenduidig en binair op perceelsniveau te detecteren op Vlaamse schaal. GIS-analyses leveren de meest consistente resultaten, maar enkel in de vorm van indicatieve, probabilistische kaarten. De geteste methodieken op basis van satellietdata blijken momenteel onvoldoende onderscheidend.

Op basis van deze resultaten ligt de meerwaarde van drainagekartering vooral op gebiedsniveau, waar de focus niet zozeer ligt op de vraag of een perceel gedraineerd is, maar op hoe waarschijnlijk drainage op een perceel voorkomt en hoe relevant dit is in functie van verschillende beleidsdoelstellingen. Verder onderzoek dient te focussen op de combinatie van GIS-data met meer gerichte en accurate remote-sensing indices, die samen inzicht kunnen geven in de drainage-waarschijnlijkheid van een perceel. Een dergelijke probabilistische benadering sluit beter aan bij uiteenlopende initiatieven rond klimaatslimme landbouw, natuurherstel, waterkwaliteit en waterbuffering in kader van droogtebestrijding.

- Møller, A. B., Beucher, A., Iversen, B. V., & Greve, M. H. (2018). Predicting artificially drained areas by means of a selective model ensemble. *Geoderma*, 320, 30–42.
- Naz, B. S., Ale, S., & Bowling, L. C. (2009). Detecting subsurface drainage systems and estimating drain spacing in intensively managed agricultural landscapes. *Agricultural Water Management*, 96(4), 627–637. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.10.002>
- Northcott, W. J. V., & Cooke, R. (2000). Mapping subsurface drainage systems using remote sensing and GIS. In *Proceedings of the ASAE Annual International Meeting* (Milwaukee, WI, USA).
- Pearson, L. (2015). Artificial subsurface drainage in Southland. Environment Southland technical report.
- Rahmati, M. (2026). Soil moisture retrieval from Sentinel-1: Lessons learned after more than a decade in orbit. *Remote Sensing of Environment*, 333, 115146. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115146>
- Raut, S. (2024). Soil moisture retrieval from Sentinel-2 data using the optical trapezoidal model (OPTRAM). *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 9(4). https://www.jisem-journal.com/download/96_SD_Paper.pdf
- Rigo, J. (2025, 17 december). Kan peilgestuurde drainage polderlandbouw wapenen tegen droogte? VILT. <https://vilt.be/nl/nieuws/kan-peilgestuurde-drainage-de-polderlandbouw-wapenen-tegen-droogte>
- Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M., & Jones, S. B. (2017). The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. *Remote Sensing of Environment*, 198, 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.041>
- Smith, D. R., King, K. W., Johnson, L., Francesconi, W., Richards, P., Baker, D., & Sharpley, A. N. (2015). Surface runoff and tile drainage transport of phosphorus in the Midwestern United States. *Journal of Environmental Quality*, 44(2), 495–502. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.04.0176>
- Valayamkunnath, P., Barlage, M., Chen, F., Gochis, D. J., & Franz, K. J. (2020). Mapping of 30-meter resolution tile-drained croplands using a geospatial modeling approach. *Scientific Data*, 7, 257.
- Van de Velde, J., Franken, T., & Wolfs, V. (2025). Opstellen van GxG-kaarten voor Vlaanderen: Eindrapport. Studie in opdracht van het Departement Omgeving en de Vlaamse Milieumaatschappij.
- Vlaamse Overheid. (2025). Blue Deal 2025–2029: Kompas voor een waterwijs Vlaanderen. <https://www.integraalwaterbeleid.be/nl/bluedeal/vr-2025-1407-doc-0663-2-blue-deal.pdf>
- Williamson, T. N., Dobrowolski, E. G., Meyer, S. M., Frey, J. W., & Allred, B. J. (2018). Delineation of tile-drain networks using thermal and multispectral imagery: Implications for water quantity and quality differences from paired edge-of-field sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(1), 1–11. <https://doi.org/10.2489/jswc.74.1.1>
- Woo, D. K., Ji, J., & Song, H. (2023). Subsurface drainage pipe detection using an ensemble learning approach and aerial images. *Agricultural Water Management*, 287, 108455.



Figuur 49: Sequentie september 2018.



Figuur 51: Sequentie april 2020.

